

Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación
2018-2019

Trabajo Fin de Grado

“Disrupción tecnológica con Li-Fi: implicaciones tecnológicas, económicas y regulatorias”

Álvaro Caballero Pamos

Tutora

Raquel Pérez Leal

Febrero de 2019



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

RESUMEN

En este trabajo se va a realizar un estudio de la tecnología de Li-Fi por su futuro potencial dentro del ámbito de las comunicaciones inalámbricas. Para ello se van a analizar varios campos que rodean a dicha tecnología, entre otros, su implicación tecnológica, donde se desarrollarán las características tecnológicas, sus particularidades, y se realizará una comparativa con otras tecnologías actuales utilizadas en las comunicaciones inalámbricas.

Otro campo que se estudia en este trabajo es el de la estandarización y el marco regulador que soporta esta tecnología. En el primer caso se analizan en detalle los estándares más representativos, en el segundo, se citarán todos los organismos y leyes implicados en la regulación de esta nueva tecnología en fase de desarrollo.

También se realizará un estudio socio-económico para descubrir qué implicaciones supondría la entrada al mercado una tecnología como esta, analizando sus competidores, sus amenazas y la fuerza de negociación tanto con proveedores como con clientes.

Para concluir, se tendrá en cuenta todo este análisis para obtener resultados y conclusiones acerca del avance de esta tecnología.

Palabras clave:

Li-Fi, comunicaciones inalámbricas, luz, LED, rango visible.

ABSTRACT

In this document, a study of Li-Fi technology will be carried out, taking into account the possibility of its popularization and implementation within the field of wireless communications. To do this, several fields surrounding technology will be analyzed, that is, its technological involvement, where the technological characteristics will be developed, their particularities, and a comparison will be made with other current technologies used in wireless communications.

Another field that is studied in this document is the standardization and the regulatory framework that supports this technology. In the first case, the most representative levels are analyzed in detail, and secondly, all the agencies and laws involved in the regulation of this new technology in the development phase will be cited.

A socio-economic study will also be carried out to discover what implications a technology like this would imply when entering the market, analyzing its competitors, its threats and the negotiation strength of both suppliers and customers.

To conclude, all this analysis will be taken into account to obtain results and conclusions about the progress of this technology.

Key words:

Li-Fi, Wireless communications, light, LED, visible range.

EXTENDED ABSTRACT

The idea of this document emerges from the need to find a new technology for wireless communications that deals with Wi-Fi (Wireless Fidelity) technology. This need arises because of the approach of some problems in the current technological and socioeconomic fields.

Wi-Fi technology uses radio frequency waves for the transmission and realization of wireless communications. The big problem encountered in dealing with this technology is the high saturation of the electromagnetic spectrum in this range, that of radio frequencies. Nowadays, there are billions of devices capable of communicating with each other and connecting to the network wirelessly, amounting to hundreds of Tbytes of data transmitted at the same time. For this reason, we find a situation of high saturation of the radio frequency range of the electromagnetic spectrum.

Another problematic point is the large number of radioelectric antennas that act as base stations to provide service and connectivity to wireless communications that use the range of radio frequencies of the electromagnetic spectrum. These base stations consume a large part of their energy in their self-cooling, so, although they are useful and allow the proper use of wireless communications, they are not all that is profitable for a good use of technology.

In addition to the problems mentioned above, some others can be found that also lead to think if this technology is the most efficient to perform wireless communications. One of these problems mentioned is the security of the data that is transmitted. It has been shown that the data sent through radio frequency waves can be intercepted and violated with greater or lesser success depending on the security measures and the protection in the transmission of this data.

Apart from the security in the transmission of information, there is also a big problem in the scope of radio frequencies. There are places or spaces where, for safety or because it is not available, it is not possible to use this type of waves. Some examples are those places where it is forbidden to use network connectivity, such as in nuclear power plants, oil stations, some areas of hospitals, in airplanes, or places where coverage of the range of these radio frequencies does not reach, as in some areas of

underground transport, or at large depths, such as wells or at high altitudes, or as in the mountains.

In all these cited examples the use of wireless communications through radio frequencies is not possible.

For these reasons the idea of the search for a new technology comes up to help solve all these problems. In this way, Professor Harald Haas concludes that this possible technology could be what we currently known as Li-Fi (Light Fidelity) technology.

This technology would be able to tackle all those previous problems encountered when using radio frequencies. Regarding the saturation of the electromagnetic spectrum range, the Li-Fi technology would use the visible range of the spectrum, which is currently not used for this purpose, wireless communications, and also, Professor Haas, ensures that this range has a capacity ten thousand times bigger than the range used with Wi-Fi technology, radio frequencies.

Regarding the issue of the large number of base stations, which fail to maximize their efficiency and profitability, Li-Fi technology proposes to provide all those devices capable of making use of the wireless communications with the necessary electronics to be able to use this technology, among them, LED (Light.Emitting Diode) devices, through which the transmission and reception of information would take place.

In addition, Li-Fi technology has a particularity, the transmission of information is necessarily done using a strictly direct line of sight, since light is not able to cross solid materials and in a short distance of a few meters. This feature can be both an advantage and a drawback. In this case, the big advantage of this peculiar feature is that the transmission link is very difficult to attack and violate, due to the short physical space between transmitter and receiver and the need to have direct line of sight. With this particularity, there is a great improvement in security level, being much more difficult to penetrate the communications using this technology.

To complete the study of the problem of Wi-Fi technology and the possible solutions offered by Li-Fi technology, the impossibility of using radio frequencies in certain places and spaces has to be mentioned. Li-Fi technology, would not have these prohibitions because in those places where the use of radio frequencies is restricted, it can be used as a lighting method, so it could also be used for wireless communications.

The same applies to spaces where the range of radio frequencies does not reach, at great depths or at high altitudes, as in the mountains. In all these places, the use of light is possible, so communication and transmission in these areas would also be possible.

For all these reasons, there is a certain attraction in the possible study of Li-Fi technology and its future possibilities. This is the main motivation for the realization of this project, find a general vision of this technology that allows to analyze and deduce its development and implantation opportunities in the market. Another point of motivation is to know and study a very promising technology for the future.

In this project, Li-Fi technology is studied and its current impact. The context in which this technology is addressed includes the different solutions for fixed access wireless communications that exist in the market today. For this reason, Wi-Fi technology has been analyzed, commenting on all its most relevant technical characteristics, such as the frequency of work, the bandwidth, the speed of the transmission, the range or the maximum distance that can be achieved using this technology, and the line of sight.

Apart from the Wi-Fi technology, other technologies based on wireless optical communication have also been studied, in this case the VLC (Visible Light Communication) and its operation. The presentation of these technologies gives way to the deepening of the objective of the work, to the analysis of the Li-Fi technology, dealing with the technological, socio-economic and regulatory implications.

Regarding the technological part of the analysis, it focuses on the transmission characteristics, just as with Wi-Fi technology: the working frequency, bandwidth, transmission speed, range, line of sight, etc. Apart from these characteristics, the system used for communication is presented.

In order to face the current state of this technology, it is important noting that it is a young technology, in the process of being studied, developed and advanced, and that possible future applications on which the Li-Fi could be implemented are being discussed. Among these applications are the Internet of Things, using technology for communication between devices, as a method of payment or identification, or viewing streaming content.

Other possible applications, mentioned above, are those that could be included in the industry sector, such as nuclear, electric or oil power plants, as well as in the field of health, where in certain areas of hospitals, where it is currently not possible, wireless communications could be used.

One of the most promising applications is to incorporate it into transport. In this area, it is proposed to equip the vehicles to communicate with each other and thus prevent possible accidents. Also, as previously mentioned, there is the possibility of implementing this technology in other transports, such as airplanes, where radio frequencies cannot be used, or on buses, as a leisure activity.

So, in a distant future could be given the possibility of provisioning all the lights already existing in the streets with the necessary electronics to use this technology, being able to be connected to the network at all times, as long as these lights were on.

Continuing with the technological part, a study is also carried out analyzing the different modulation techniques that can be used to perform the transmission with this technology. In this case, the modulation of the single carrier, its characteristics, its advantages and disadvantages are explained; as with multi-carrier modulation, and ending with a specific modulation designed for the transmission of Li-Fi technology.

Once the technological characteristics of Li-Fi are known, a comparison is made with other wireless communications technologies currently on the market; in particular, a comparison is made between the Li-Fi, Wi-Fi, Bluetooth and infrared technologies. From this comparison, conclusions can be drawn on which market Li-Fi technology can compete in and what its limitations are.

After locating the Li-Fi technology in the current set, an inherent characteristic of this technology is explained, as it is a technology designed for multiusers access to the network. This feature allows connecting several users to the same network, as well as allowing a user to connect to several networks while on the move. Consequently, several ways to perform this functionality that are currently studied in order to find the best technique or techniques are explained.

Another aspect that is studied in this work is the regulatory framework and the standardization of this technology, where this technology is placed in the legal framework, indicating that laws, royal decrees and organisms act on the regulation of this technology. As mentioned, it is a technology in the process of development and

does not yet compete in the current market; this issue is also shared by its regulation, which is also under development.

The main laws and royal decrees will be discussed as well as the different organisms, at national and international level, that are in charge of joining all the necessary regulation for a technology as promising as this one. In turn, we will mention the most relevant standards from which we are currently working to include the standardization of Li-Fi.

Finishing with the proposed analysis for this new technology, a study is carried out in which it is explained that the market launch of Li-Fi technology can be involved. For this analysis, the entry and exit barriers of the market are studied, that is, the negotiation power of both the providers and suppliers of the consumer electronics needed to make this technology and the customers and companies interested in selling this technology. It also studies what competitors would be in the current market and who could pose a threat.

In addition, part of the analysis is dedicated to explaining the implications that the implementation of Li-Fi technology could have in current day-to-day life, the advantages and disadvantages that this would entail. The analysis made by Professor Harald Haas to reach the conclusion that this technology is necessary and beneficial to today's society is also discussed.

With all these data it is possible to draw certain conclusions about this technology. Li-Fi is a technology that will be developed and implemented in future networks, which compete in a market defined by the features and characteristics presented, that is, areas where security is required, ease of implementation through ordinary LEDs and high transmission speeds.

In addition, it should be noted that the standardization bodies are interested in its development.

We mainly conclude that its nature will not be to replace technologies that already exist today, but to be a complement that improves wireless communications.

ACRÓNIMOS

ACO-OFDM, Assymmetrically Clipped biased Optical - Orthogonal Frequency Division Multiplexing. 18

ADO-OFDM, Asymmetrically Clipped DC-biased Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing. 18

AENOR, Asociación Española de Normalización. 30

ASE, Area Spectral Efficiency. 24

BEREC, Body of European Regulators for Electronic Communications. 30

BOE, Boletín Oficial del Estado. 29

CENELEC, Comité Europeo de Normalización Electrotécnica. 30

CEPT, Conferencia Europea de Administraciones de Postales y Telecomunicaciones. 30

CES, Consumer Electronics Show. 8

CIM, Colour Intensity Modulation. 20

CNMC, Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. 31

CoMP, Coordinated Multi-Point. 28

CSK, Colour Shift Keying. 19

DAC, Digital to Analogue Converter. 17

DCO-OFDM, Direct Current Optical - Orthogonal Frequency Division Multiplexing. 17

EPA, Environmental Protection Agency. 40

ETSI, European Telecommunications Standards Institute. 30

FSO, Free Space Optical. 7

HD, High Definition. 8

IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers. 15

IFFT, Inverse Fast Fourier Transform. 17

IM/DD, Intensity Modulation / Direct Detection. 17

IoT, Internet of Things. 10

LED, Light.Emitting Diode. 1

Li-Fi, Light Fidelity. 1

LOS, Line Of Sight. 6

MAC, Media Access Control. 31

MCM, Multi-Carrier Modulation. 16

MM, Metameric Modulation. 20

NOMA, Non-orthogonal multiple access. 26

OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing. 16

OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access. 25

ONU, Organización de Naciones Unidas. 30

OOK, On-Off Keying. 14

OWC, Optical Wireless Communication. 6

PAM, Pulse Amplitude Modulation. 14

PPM, Pulse Position Modulation. 14

PWM, Pulse Width Modulation. 15

QAM, Quadrature Amplitude Modulation. 16

QPSK, Quadri-Phase Shift Keying. 16

RGB, Red Green Blue. 19

RPO, Reverse Polarity Optical. 18

SCM, Single-Carrier Modulation. 14

SINR, Signal-to-Interference-plusnoise ratio. 26

SNR, Signal to Noise Ratio. 25

SDMA, Space Division Multiple Access. 25

SHF, Super High Frequency. 21

TDMA, Time Division Multiple Access. 25

TPC, Transmit Pre-Coding. 28

UHF, Ultra High Frequency. 21

UIT, Unión Internacional de Telecomunicaciones. 30

UNE, Una Norma Española. 31

VLC, Visible Light Communications. 2

VPPM, Variable Pulse Position Modulation. 15

Wi-Fi, Wireless Fidelity. 1

WLAN, Wireless Local Area Network. 31

WMAN, Wireless Metropolitan Area Network. 31

WPAN, Wireless Personal Area Network. 31

WWAN, Wireless Wide Area Network. 31

ÍNDICE

1. Introducción y motivación	1
2. Soluciones inalámbricas para acceso fijo.....	3
2.1 Wi-Fi.....	4
2.2 Comunicaciones ópticas.....	6
2.2.1 VLC	7
2.2.2 Li-Fi	8
3 Estado del arte	10
3.1 Aplicaciones	10
3.2 Tecnología: Técnicas de modulación para Li-Fi.....	14
4 Comparativa entre tecnologías de comunicaciones inalámbricas	21
4.1 Ventajas, desventajas y similitudes	21
5 Acceso multiusuario.....	25
6 Estandarización y marco regulador.....	29
6.1 Leyes y organismos.....	29
6.2 Estándares	31
7 Impacto socio-económico	35
8 Planificación y presupuesto	41
9 Conclusiones y trabajo futuro.....	46
10 Bibliografía.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Espectro electromagnético.....	3
2. Esquema del sistema li-fi	9
3. Sistema Li-Fi en la vida cotidiana.....	11
4. Li-Fi entre vehículos.....	12
5. Li-Fi en la vía pública	13
6. Adaptación estratégica de la tecnología Li-Fi (Adaptación de Porter).....	35
7. Diagrama de Gantt.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

1. Comunicaciones inalámbricas	21
2. Presupuesto.....	44

1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

El objetivo de este trabajo es el estudio de la tecnología Li-Fi (*Light Fidelity*) atendiendo a las implicaciones tecnológicas, económicas y regulatorias.

Li-Fi es una tecnología en proceso de estudio y avance, cuyo propósito es la transmisión de datos a través de la luz, utilizando, para ello, dispositivos LED (*Light Emitting Diode*).

A través de todo un sistema de comunicación, contando con emisores, un canal de comunicación y receptores, se consigue transmitir información de un punto a otro, con una distancia máxima de unos 8 m, a través de la emisión de luz de los dispositivos LED, codificándola para poder transmitirla adecuadamente [1].

La motivación en la que se basa la realización de este trabajo es la posibilidad de que Li-Fi sea un gran complemento o incluso que sustituya parcialmente a la actual tecnología de Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) al ser una tecnología más novedosa que proporciona nuevas prestaciones.

La elección de una tecnología como esta es debido a la saturación del espectro electromagnético de radiofrecuencias y a la búsqueda de alternativas para la transmisión y propagación de información.

También, se tiene en cuenta el gran despliegue de dispositivos LED que hay en cualquier infraestructura actual, y cada vez mayor, por lo que todo ese despliegue podría ser aprovechado, no sólo para su función principal, que es iluminar, sino también para poder transmitir información.

Para ello, este trabajo se divide en varios capítulos, donde se explicarán las principales características de esta tecnología, y se intentará realizar un análisis tecnológico y económico comparando diferentes soluciones. Se comenzará presentando y explicando algunas soluciones inalámbricas, en este caso se hablará de la tecnología Wi-Fi, ya que es la más conocida y utilizada, con un objetivo similar a la tecnología Li-Fi, que es el objetivo de este trabajo.

Aparte de la tecnología de Wi-Fi, se presentarán también algunas otras soluciones inalámbricas basadas en la comunicación óptica. En este caso, se comentarán y explicarán las principales características de Li-Fi, su origen, su composición y su funcionamiento. También, relacionado con las soluciones inalámbricas que utilizan las

comunicaciones ópticas, se expondrán otras alternativas VLC (*Visible Light Communications*).

En el tercer capítulo se expondrá el estado del arte, es decir, la influencia que alcanza esta tecnología en la actualidad, su nivel de avance. A su vez se comentarán las aplicaciones en las que se utiliza esta tecnología y se explicarán las diferentes técnicas de modulación utilizadas en esta tecnología.

En el siguiente apartado, se llevará a cabo una comparativa con otras tecnologías, también mencionadas en este trabajo, como Wi-Fi y otras tecnologías de comunicación inalámbricas, incluyendo las ventajas, desventajas y similitudes entre todas estas tecnologías.

Para continuar, en el quinto capítulo, se expondrá una característica utilizada para la tecnología principal, el acceso multiusuario.

A continuación, se hablará acerca del marco regulador que rige esta tecnología, así como el estándar en el que está sustentada. Además de todo lo anterior, se realizará un análisis socioeconómico, donde se estudiará el impacto que ejerce y puede ejercer esta tecnología en la actual sociedad.

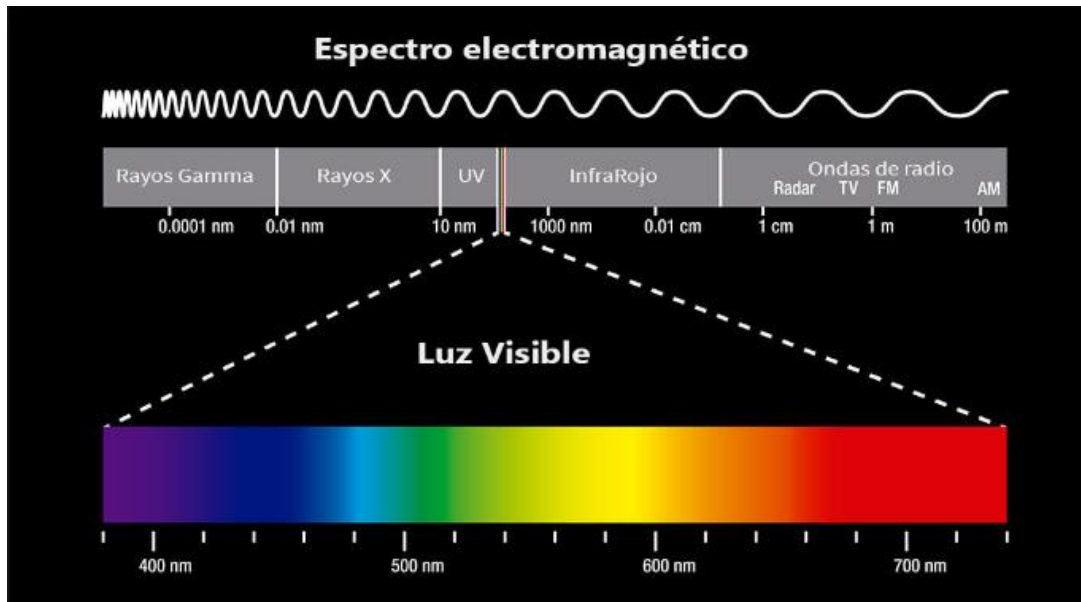
Para terminar, se expondrá la planificación de dicho proyecto y se calculará un posible presupuesto para realizar un proyecto de este tipo, y se tratarán las últimas conclusiones y el posible futuro que le puede llegar a esta novedosa tecnología.

2. SOLUCIONES INALÁMBRICAS PARA ACCESO FIJO

En este capítulo se va a hacer mención a algunas tecnologías actuales que se utilizan como soluciones inalámbricas, en este caso se tratarán el Wi-Fi, y dentro de las comunicaciones ópticas, el Li-Fi y las VLC.

Todas estas tecnologías comparten la particularidad de realizar la propagación y el intercambio de información sin necesidad de ningún tipo de cableado entre los dispositivos, tanto emisores como receptores. Además, las tecnologías de Li-Fi y las VLC utilizan el espectro electromagnético para la transmisión de la información, en concreto el rango del espectro denominado como visible, ya que es compatible con las tecnologías que se tratan actualmente y que no es perjudicial para la salud.

Teniendo en cuenta el espectro electromagnético completo (Figura 1) [2], cabe destacar que la tecnología de Li-Fi utiliza las frecuencias dentro del rango de luz visible.



1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

También existen otras tecnologías, menos usadas para las comunicaciones, debido a su corto alcance de transmisión. Dentro de estas tecnologías encontramos, por ejemplo, a los infrarrojos o al Bluetooth [3].

En cuanto a los infrarrojos, se puede considerar que no es muy utilizada debido a sus grandes limitaciones, por su corto alcance y por su sensibilidad a obstáculos, reduciendo su utilización a espacios muy reducidos y transmisión directa, sin obstáculos de por medio.

Por ejemplo, se utiliza para el control de mandos a distancia, ya sean de televisión, o de apertura de puertas de garaje, facilitando el uso de estos dispositivos, o también en el hardware periférico de los ordenadores, como pudieran ser el ratón, el teclado, el monitor, lector de CDs, etc. Como se puede apreciar, todos son ejemplos donde la distancia de uso es bastante reducida.

Esta tecnología utiliza una longitud de onda de entre unos 2.5 μm y 50 μm , se consigue transmitir a una velocidad de unos 150 Kbps y su alcance llega desde un 1 m hasta como máximo 5 m, en algunas ocasiones.

En cuanto a la transmisión por Bluetooth, se puede considerar más eficaz que la transmisión por infrarrojos, teniendo en cuenta el objetivo de lograr una buena transmisión de datos, pero igualmente, está lejos de ser una tecnología óptima. Está pensada para una comunicación entre dispositivos móviles, como una pequeña red, a una distancia dentro de un rango de pocos metros, entre 1 m y 10 m.

Esta tecnología se caracteriza por transmitir a una velocidad en torno a los 720 Kbps, y en torno a una frecuencia de 2.4 GHz.

2.1 WI-FI

Wi-Fi es una tecnología que, actualmente, se utiliza para la conexión entre dispositivos y la red de manera inalámbrica y de esta manera, hacer posible la comunicación entre ellas permitiendo la transmisión de información sin necesidad de ningún cableado.

Esta tecnología se lleva a cabo a partir del uso de radiofrecuencias. Los dispositivos se conectan e intercambian la información a través de las ondas de radio, cumpliendo con las normativas específicas y dedicadas a este fin.

Las características más relevantes de esta tecnología Wi-Fi son:

- ❖ La frecuencia a la que se trabaja y a través de la que se hace posible la comunicación [4].
 - 2.4 GHz. Esta frecuencia tiene la ventaja de ser accesible a mayor distancia y la capacidad de conectarse a un gran número de dispositivos.
 - 5 GHz. La particularidad de esta frecuencia es que suele tener menos interferencias y espacio para un mayor número de canales, pero tiene el inconveniente de tener menor alcance y no admitir tantos dispositivos como la anterior frecuencia. Al ser mayor, se dispone de un ancho de banda más amplio, esto se traduce en la posibilidad de tener más usuarios en toda la banda de canales o de tener los mismos usuarios que en la frecuencia de 2.4 GHz, pero beneficiándose de una mayor velocidad de transmisión.
- ❖ El ancho de banda, o el rango de frecuencias, alrededor de la frecuencia de trabajo, que se utilizan para realizar dichas comunicaciones [5].
 - Cuando el canal está muy saturado, el ancho de banda que se utiliza suele ser de 20 MHz, generalmente es el ancho de banda utilizado para la frecuencia de 2.4 GHz, aunque también puede configurarse para utilizar 40 MHz.
 - Si el canal está más liberado se puede llegar a alcanzar un ancho de banda de hasta 40 MHz, que es el más habitual en la frecuencia de 5 GHz, pudiendo reducirse igualmente a 20 MHz en el caso de existir saturación en el canal.
- ❖ La velocidad a la que se transmite y se recibe la información, que dependerá del ancho de banda utilizado. Estos datos son tomados del estándar IEEE 802.11n.

- Si el canal está más saturado y el ancho de banda se acerca a los 20 MHz, la velocidad de transmisión que se conseguirá estará alrededor de los 130 Mbps para todo un mismo canal.
 - Si el canal tiene mayor disponibilidad y por lo tanto se consigue mayor ancho de banda, hasta los 40 MHz, se puede alcanzar una velocidad de hasta 300 Mbps para un canal entero.
- ❖ El alcance, o la distancia física máxima a la que pueden estar separados los dispositivos para que la comunicación se realice de una manera óptima.
- En la oferta comercial, de consumo habitual en los hogares, el alcance del amplificador puede llegar a unos 25 m.
- ❖ La línea de visión o LOS (*Line Of Sight*), que indica si es necesaria la comunicación directa entre emisor y receptor, sin obstáculos.
- No es estrictamente necesaria la línea de visión directa para esta tecnología, ya que las ondas de radio son capaces de atravesar los materiales, pero cuantos más obstáculos se encuentren en la trayectoria de las ondas, más pérdidas sufrirá la onda, más distorsionada llegará, y peor será la transmisión, en cuanto a calidad y a velocidad se refiere.

2.2 COMUNICACIONES ÓPTICAS

En este apartado se hará mención a alguna de las OWC (*Optical Wireless Communication*) o comunicaciones ópticas inalámbricas existentes en la actualidad.

Si se habla de comunicaciones inalámbricas, inmediatamente se tienen en cuenta las comunicaciones a través de las microondas o a través de radio.

Dentro de las comunicaciones inalámbricas se reparte el espectro electromagnético, diferenciando diferentes bandas de frecuencia, y, por lo tanto, diferentes tecnologías, como infrarrojos, Bluetooth o las propias comunicaciones ópticas. Por lo tanto, se

deduce que las comunicaciones ópticas son una alternativa a una comunicación inalámbrica, utilizando un rango de frecuencias distinto del espectro electromagnético.

2.2.1 VLC

VLC es una tecnología que también utilizan los dispositivos LED para la transmisión de datos.

La VLC, en su esencia, consiste en utilizar la luz para comunicar información. Un ejemplo de VLC, sería una luz que parpadea de manera muy rápida, imperceptible el parpadeo para el ojo humano, de esta forma simplemente se vería una luz constante, y a su vez, a través de un receptor que fuese capaz de captar el parpadeo de la emisión de luz, decodificarlo para obtener la información.

A grandes rasgos, podría considerarse una especie de código Morse utilizando la luz, sólo perceptible para el receptor y decodificador [6].

Está concebida como una tecnología de comunicación punto a punto, pensada para la sustitución de un sistema cableado. La comunicación punto a punto, considera únicamente dos puntos finales, o actuadores, un emisor y un receptor. Esta comunicación suele ser bidireccional, para que los dos extremos emitan y reciban información, pero también puede considerarse un sistema unidireccional, donde únicamente un punto emita y el otro reciba.

Dentro de las VLC se puede hablar de algunos conceptos relacionados [7], [8]:

❖ FSO (*Free Space Optical*) o comunicación óptica de espacio libre.

Esta comunicación, es similar a las VLC, con la salvedad de que en la FSO también se tiene en consideración los rayos ultravioletas (UV) o los rayos infrarrojos (IR), ya que estos no pertenecen al rango visible del espectro electromagnético, al igual que los rayos láser, utilizados para algunas comunicaciones entre edificios.

Además, es más común en esta tecnología utilizar para la transmisión de la información dispositivos de tipo diodos láser en lugar de dispositivos LED.

- ❖ Li-Fi, es una tecnología que considera tanto la comunicación entre dispositivos y entre dispositivos y la red, como la integración de los puntos de acceso dentro de la red; a diferencia de las VLC que únicamente consideran las comunicaciones. La particularidad de esta tecnología es que el receptor está preparado para recibir un parpadeo en la intensidad de la luz recibida, y sólo dichas intensidades, por lo que, si en el receptor incidieran otras luces con intensidades diferentes a las configuradas, serían totalmente transparentes para la comunicación, aunque pudiendo introducir cierta distorsión, interferencias y ruido al enlace.

2.2.2 LI-FI

La tecnología a la que llamamos Li-Fi se ha empezado a investigar y a desarrollar recientemente, durante los últimos 10 años.

La particularidad de esta tecnología es la capacidad de utilizar la luz como sistema de comunicaciones, emitiendo y recibiendo datos. Li-Fi utiliza las frecuencias altas del espectro electro-magnético, las frecuencias recogidas dentro del rango visible, entre 400 THz y 800 THz. Es por este motivo por el cual se le puede considerar como una tecnología de comunicación de onda nanométrica. Se utilizan ondas lumínicas de entre 375 nm y 780 nm.

Utilizando ese rango de frecuencias, y emitiendo la luz a partir de diodos LED, se puede llegar a obtener una velocidad de transmisión por encima de los 3 Gbps [8].

Esta tecnología no es estrictamente LOS, ya que la luz es capaz de rebotar en las superficies de los materiales, y de esta manera conseguir transmitir toda la información. Pero como es natural, cuantos más obstáculos se encuentren entre emisor y receptor, peor será la transmisión, y más dificultará la comunicación.

La primera vez que se empleó esta tecnología de esta manera fue en julio de 2011, durante el TED Global, donde el profesor alemán de comunicaciones móviles Harald Haas ofreció una conferencia "*Wireless data from every light bulb*" [9]. En dicha conferencia, el profesor Haas fue capaz de reproducir un video en HD (*High Definition*) desde una lámpara. Demostró que, si bloqueaba el haz de luz de dicha lámpara, el video dejaba de reproducirse, mostrando que realmente la reproducción del video venía dada por la proyección de luz [10].

El momento en el que se presentó esta tecnología al público fue en enero de 2012, en Las Vegas, en la Feria Internacional de Electrónica de Consumo, CES (*Consumer Electronics Show*). En esta Feria se mostró cómo dos dispositivos, en aquel caso, dos teléfonos inteligentes, intercambiaban información entre sí, a una distancia de unos 10 metros.

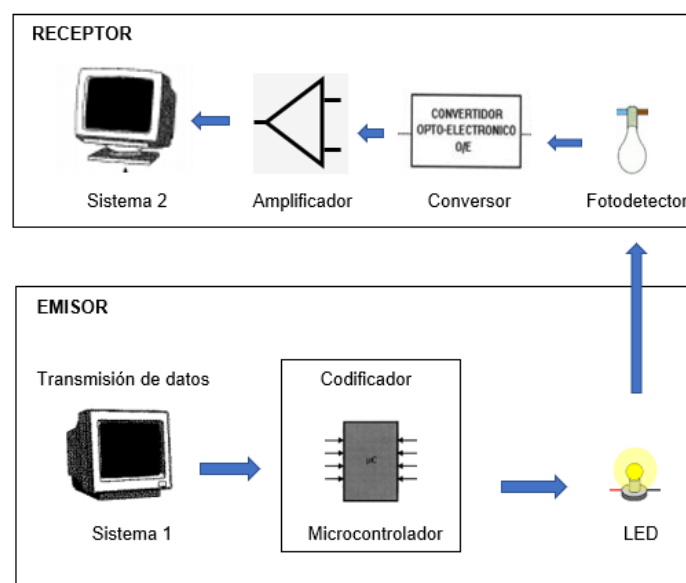
Esta tecnología utiliza el siguiente sistema de funcionamiento (Figura 2):

- ❖ Emisor. Esta unidad transmisora consta de una lámpara LED controlada por un codificador. Dicha función se encarga de realizarla un microcontrolador, que codifica y convierte los datos a enviar.

Se genera una codificación binaria a partir de la cual se indica la frecuencia y, por lo tanto, la longitud de onda del haz de luz, y el encendido y apagado de los LEDs emisores.

- ❖ Receptor. La unidad receptora es la que se encarga de recibir y procesar la información, que llega de forma lumínica, y se transforman para ser utilizados por el sistema final. Está compuesto de un fotodetector, el cual convierte las señales ópticas en señales eléctricas, un amplificador y una circuitería que se encarga del procesamiento de los datos.

Todos los datos que se reciben son procesados, se demodulan y se filtra el ruido añadido en la transmisión, después son amplificados y enviados al dispositivo final.



2. ESQUEMA DEL SISTEMA LI-FI

3. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se tratará el estado del arte, es decir, la actualidad de la tecnología Li-Fi, en concreto, las aplicaciones que se valoran actualmente y las diferentes posibilidades que se barajan para un futuro, una vez que la tecnología de Li-Fi se encuentre normalizada e implantada.

Por otra parte, el estado del arte desde el punto de vista técnico se enfoca en las técnicas de modulación que se utilizan en la transmisión de la información para esta tecnología, que es uno de los aspectos más discutidos.

3.1 APLICACIONES

Como se ha explicado anteriormente, la tecnología Li-Fi se encuentra en proceso de estudio y avance, por lo que en la actualidad no podemos encontrarla en uso en ninguna aplicación. No obstante, se podría decir que su ámbito de aplicación es prácticamente cualquier lugar o situación en la que se requiera una red de datos.

Por ejemplo, sería de gran utilidad en ámbitos como la industria, la sanidad, el transporte, así como en hogares, prestando atención a la comodidad y eficiencia, a la seguridad, o incluso utilizado para campañas de marketing, poniendo a nuestra disposición las ofertas, productos o promociones que se deseen [11].

Algunas de las posibles aplicaciones en las que se está trabajando para incluir la tecnología de Li-Fi son las siguientes:

- ❖ El internet de las cosas o IoT (*Internet of Things*).

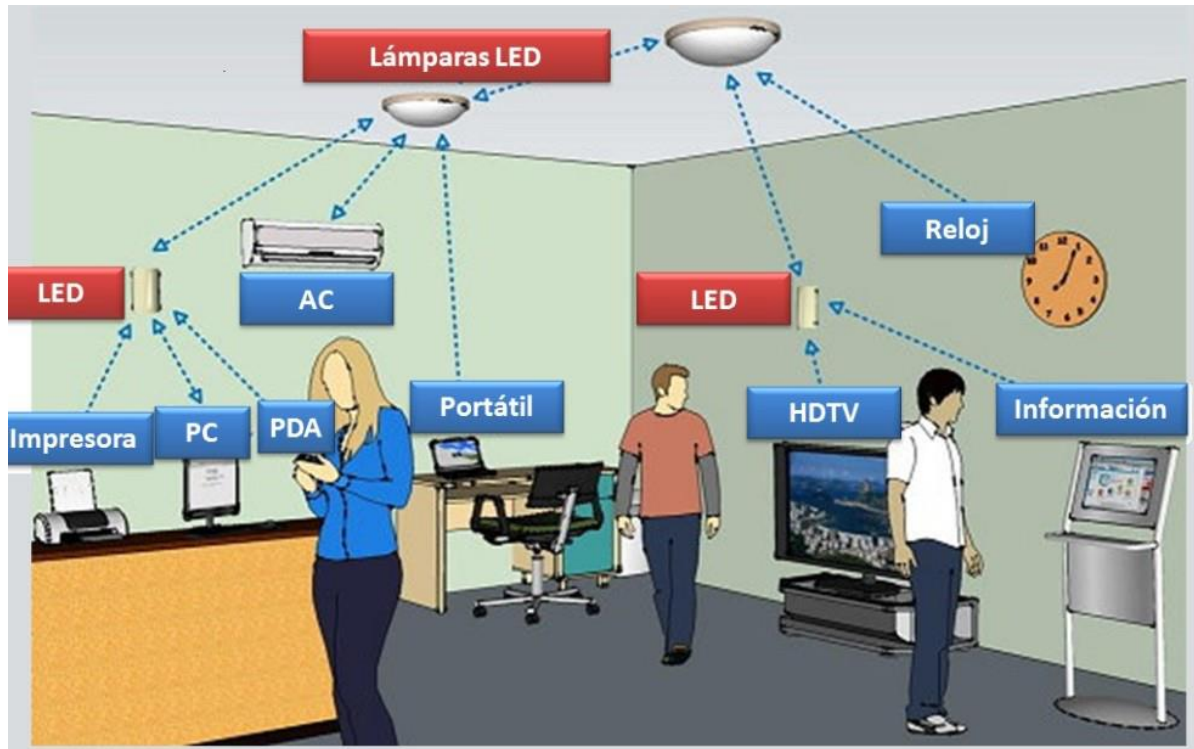
Una posible aplicación sería utilizando esta tecnología como métodos de pago o métodos de identificación. Sería una transmisión de información a cortas distancias, utilizando esta tecnología para facilitar la vida cotidiana.

También, como comunicación entre equipos y diferentes dispositivos. Es la aplicación principal, el gran objetivo, como complemento a la tecnología Wi-Fi.

Aparte, la posibilidad de una transmisión en “*Streaming*”, la transmisión en la que la información se utiliza al mismo tiempo que se está transmitiendo, de manera continua. De esta forma podría conseguirse una transmisión en directo,

pudiendo llegar a realizarse en calidad HD, debido a la eficacia y las características de Li-Fi.

A su vez, mejorando la eficacia de las tareas en el hogar facilitando la comunicación entre los diferentes sistemas o dispositivos domésticos (Figura 3) [12].



3. SISTEMA LI-FI EN LA VIDA COTIDIANA

❖ Industria.

En cuanto a la industria, en el sector que abarca las centrales eléctricas, nucleares, o petrolíferas, es necesaria una red de datos que comunique los diferentes sistemas que las componen entre sí, y de una manera rápida para la monitorización de sus actividades.

La utilización de radiofrecuencias en estos lugares está limitada o prohibida por normativa, por lo que utilizar la luz, como modo y medio de transmisión es una gran solución a este problema.

❖ Sanidad.

Al igual que en el caso de la industria, en el sector sanitario también hay zonas restringidas a ciertas radiofrecuencias, imposibilitando la comunicación a través

de la transmisión de datos. Por ejemplo, están prohibidas estas comunicaciones en los quirófanos, por la posibilidad de causar interferencias con distintos equipos médicos. De igual forma, la tecnología Li-Fi sería una posible solución a este tipo de comunicación.

Otra aportación añadida por la implantación de esta tecnología en los hospitales, sería la sustitución de todo el sistema incómodo de cableado de muchos equipos médicos, facilitando y ayudando a la realización de las diversas tareas médicas.

❖ Transporte.

Mirando a un futuro no muy lejano, se considera posible dotar a los vehículos autónomos con sistemas Li-Fi, a través de los faros con luces LED, para poder realizar la comunicación de un vehículo a otro y obtener información del entorno que les rodea, como peatones, señales de tráfico, semáforos, carriles, aceras, aparcamientos...así como intercambiarla con el mismo, con el fin de prevenir posibles accidentes. Podemos ver un ejemplo de una simulación en la Figura 4 [13].



4. LI-FI ENTRE VEHÍCULOS

De cara al transporte público, existe la posibilidad de acondicionar los vehículos e integrar en ellos los sistemas Li-Fi, para poder utilizar esta tecnología, por ejemplo, a modo de ocio.

En el caso del transporte aéreo, también existiría la posibilidad, al igual que en la sanidad, de sustituir muchos sistemas de cableados en algunos de los equipos del vehículo, facilitando así las tareas de a bordo y reduciendo el peso del vehículo.

Aprovechando todos los dispositivos lumínicos existentes en las vías de circulación, y provistos con dispositivos LED, una buena aplicación sería utilizarlos para la comunicación, ya sea con los usuarios de las vías, con los vehículos, con las viviendas...Vemos un ejemplo de cómo podría llegar a ser en la Figura 5 [14].



5. LI-FI EN LA VÍA PÚBLICA

❖ Seguridad.

Como forma de seguridad, la tecnología Li-Fi podría utilizarse en cualquier caso de emergencia en aquellos lugares donde la cobertura de datos no llega o se limita, como túneles o aparcamientos subterráneos, estaciones de metro, etc.

Debido a la direccionalidad de la transmisión de la información con la tecnología Li-Fi, proporcionaría una mejor solución a la protección de la información y de los datos. De esta manera se limitaría la actividad de sustracción de la información a interceptores de luz, colocados en la línea directa de la comunicación.

3.2 TECNOLOGÍA: TÉCNICAS DE MODULACIÓN PARA LI-FI

Como se ha explicado en capítulos anteriores, la tecnología Li-Fi realiza la transmisión de información utilizando el rango visible del espectro electromagnético. De esta manera, para la comunicación se utilizan técnicas de modulación mediante radiofrecuencias.

A continuación, se explican algunas técnicas de modulación utilizadas y alguna específica que se utiliza para la comunicación con la tecnología Li-Fi [8].

❖ Modulación de portadora única.

Una de las técnicas más utilizadas en la comunicación a través de la tecnología de Li-Fi es la modulación de portadora única (SCM, *Single-Carrier Modulation*). Dentro de esta técnica se utilizan comúnmente una serie de esquemas, como por ejemplo la Modulación por Amplitud de Pulsos (PAM, *Pulse Amplitude Modulation*), que se utiliza en los sistemas de comunicaciones por infrarrojos, la Modulación por Posición de Pulsos (PPM, *Pulse Position Modulation*) o la Modulación Digital de Amplitud (OOK, *On-Off Keying*) [15].

Esta última, OOK, es una de las modulaciones más utilizadas; esto es debido a su sencillez y a la buena relación que se obtiene entre su complejidad de implementación y el rendimiento que ofrece ante la comunicación. La forma de trabajar de la OOK se basa en el encendido y apagado del LED de manera

secuencial. Se trata de una modulación binaria, en la que 'On' emite la señal y en 'Off' no se emite nada, se podría considerar con unos y ceros en el sistema binario.

Atendiendo al estándar IEEE 802.15.7 [16], se puede llegar a lograr la modulación mediante dos procesos:

- Definiendo una duración fija de los niveles de encendido y apagado del LED.

Con esto se consigue mantener una velocidad de transmisión de los datos, aunque puede empeorar la calidad de la transmisión en los niveles bajos o atenuados de la emisión.

- Aplicando una compensación de los símbolos. Se insertan pulsos de encendido y de apagado adicionales para lograr que la atenuación media de la transmisión fuese constante, es decir, que hubiese el mismo número de pulsos de encendido que de apagado. En el caso en el que hubiese más pulsos de un tipo que de otro, causaría la disminución de la velocidad de la transmisión.

La desventaja de este proceso se encuentra en la irregularidad de la tasa de transmisión. Dicha irregularidad podría afectar a la calidad de la transmisión.

De la modulación PPM se puede decir, en comparación con la OOK, que es más eficiente en cuanto a potencia, pero en detrimento de empeorar la eficiencia espectral.

Una posible variante de la modulación PPM es la Modulación por Posición de Pulsos Variables (VPPM, *Variable Pulse Position Modulation*), la cual puede variar la anchura de los pulsos teniendo en cuenta la intensidad del brillo del LED deseado en cada instante, y de tal forma que se consigue ayudar a la regulación y aumentar la eficiencia espectral.

De esta manera, se puede relacionar la VPPM con una combinación entre la PPM y la Modulación por Ancho de Pulsos (PWM, *Pulse Width Modulation*).

Otro tipo de esquema dentro de la modulación de portadora única es la llamada modulación espacial óptica [17].

Es una modulación que permite trabajar en el dominio de la señal y funciona gracias a un solo LED que está activo en cada instante de tiempo. Además, el diagrama de constelaciones espaciales de señales también se emplea para transmitir datos.

Este tipo de esquema es bastante eficiente tanto en potencia como en ancho de banda, sobre todo en el sector de las comunicaciones inalámbricas interiores.

Por otro lado, también se puede considerar una variante de la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) [18].

Lo que se propone en este caso es utilizar dos señales ortogonales en sustitución de las partes real e imaginaria de la señal utilizada en la modulación de amplitud en cuadratura, para que de este modo se logre obtener mayor eficiencia espectral en las redes de transmisión con la tecnología de Li-Fi.

Esta técnica es utilizada en la modulación por desplazamiento cuadrático (QPSK, *Quadri-Phase Shift Keying*) para, por ejemplo, la transmisión por radio.

❖ Modulación multi-portadora.

Los esquemas vistos en el punto anterior (Modulación de portadora única) son muy sensibles a sufrir distorsiones en las señales transmitidas por los dispositivos LEDs y también interferencias entre los símbolos de la modulación. Estos efectos no deseados son causados una vez que se aumentan los requerimientos en la tasa de transferencia.

Como alternativa a esos esquemas, con el fin de evitar los efectos no deseados, en las comunicaciones ópticas inalámbricas de alta velocidad se ha decidido utilizar la Modulación Multiportadora (MCM, *Multi-Carrier Modulation*). Esta modulación, comparada con la SCM, es más eficiente en cuanto al ancho de banda, pero en contraposición, es menos eficiente en términos energéticos.

La modulación más utilizada en las redes Li-Fi es la Modulación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [19]. En esta modulación, se transmiten simultáneamente los flujos de datos

por medio de una colección de subportadoras ortogonales, posibilitando de esta manera eliminar la parte compleja o imaginaria de la señal [20].

Esta modulación permite mejorar el rendimiento del sistema.

La modulación OFDM se suele implementar mediante la Transformada Discreta de Fourier, la cual utiliza la Transformada Inversa de Fourier (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*), (ecuación 1), seguida de un Conversor Digital-Analógico (DAC, *Digital to Analogue Converter*).

$IDFT(IFFT):$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)nk} \quad (n = 0, 1, \dots, N-1)$$

(1)

De esta manera, se consigue generar una señal OFDM compleja y bipolar, es decir, con valores reales e imaginarios, y con valores positivos y negativos.

En los sistemas Li-Fi se suelen modificar las técnicas de modulación OFDM según los requerimientos de Intensidad de Modulación y de Detección Directa (IM/DD, *Intensity Modulation / Direct Detection*) impuestos por los dispositivos LEDs comerciales.

Para conseguir una señal de valor real a la salida, la técnica que se utiliza es pasar la señal de las subportadoras por un bloque hermítico, donde se transpone y se conjuga.

Es necesario destacar que la señal transmitida por el sistema Li-Fi ha de ser unipolar, ya que la intensidad de luz debe de ser real, y no puede ser negativa. Existen varios métodos para conseguir una señal en el dominio del tiempo que sea unipolar.

Uno de ellos es la modulación OFDM con corriente continua con polarización óptica (DCO-OFDM, *Direct Current Optical - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

Esta modulación utiliza una polarización de corriente continua positiva para la generación de señales unipolares.

Con esta modulación se consigue un aumento en el consumo total de energía eléctrica, pero se consigue no tener una pérdida adicional en la eficiencia espectral.

Otro método utilizado es el de la modulación OFDM óptica recortada asimétricamente (ACO-OFDM, *Assymmetrically Clipped biased Optical - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Este método, además de imponer la simetría hermitica, únicamente utiliza las subportadoras impares para la transmisión de datos, y las subportadoras pares se ponen al valor nulo. De esta manera se consigue que la eficiencia espectral se reduzca a la mitad.

Comparando la modulación DCO-OFDM y la ACO-OFDM se puede asegurar que la ACO-OFDM es más eficiente en términos de energía.

Adicionalmente, existe la posibilidad de combinar ambas modulaciones con el objetivo de obtener mejor eficiencia energética. De esta manera se obtiene la modulación ADO-OFDM (*Asymmetrically clipped DC-biased optical orthogonal frequency division multiplexing*) donde se utiliza el esquema de DCO-OFDM para las subportadoras pares y el de ACO-OFDM para las subportadoras impares, consiguiendo así, en algunos escenarios, mejorar la eficiencia energética.

Otro esquema propuesto con el mismo objetivo es el Óptico Polarizado Inverso (RPO, *Reverse Polarity Optical*) el cual combina la señal de OFDM de alta velocidad con la señal de PWM de baja velocidad, contribuyendo las dos señales a la iluminación del dispositivo LED. Con este esquema se maximiza el rango lineal del LED y se minimiza las posibles distorsiones no lineales de la señal.

Otra posible alternativa a estos esquemas es utilizar la matriz de Hadamard (ecuación 2) en lugar de la Transformada de Fourier como una matriz ortogonal que posibilita multiplexar varios flujos de datos [21].

$$H_N = 1 \quad H_N = \begin{pmatrix} H_{N-1} & H_{N-1} \\ H_{N-1} & -H_{N-1} \end{pmatrix}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

(2)

❖ Modulación específica de la tecnología Li-Fi

Los transmisores de Li-Fi son utilizados tanto para las comunicaciones inalámbricas como por su función para la iluminación.

La iluminación se puede obtener de dos maneras diferentes.

- Utilizando dispositivos LEDs de color azul, junto con un recubrimiento amarillo de fósforo.
- Utilizando una mezcla de dispositivos LEDs de diferentes colores cada uno.

Mediante la segunda opción, a través de LEDs de diferentes colores, se obtiene una luminaria capaz de construir un sistema de transmisión Li-Fi con una mayor posibilidad de detección y de modulación de la señal [22].

Teniendo en cuenta estas técnicas, en el estándar 802.15.7 se contempla otro tipo de modulación, en este caso la modulación por desplazamiento de color (CSK, *Colour Shift Keying*).

En esta modulación las señales se codifican según las intensidades de los colores que emiten los dispositivos LED, tomando el sistema de colores RGB (Red Green Blue).

La modulación CSK funciona de tal manera que los bits de entrada se mapean o asignan a las diferentes tonalidades cromáticas procedentes de los dispositivos LED, y de esa manera se realiza una media de las tonalidades recibidas.

Gracias a la modulación CSK podemos obtener las siguientes ventajas.

- Se garantiza un flujo constante de luz, por lo que mejora la calidad de la señal. No se producen parpadeos en las frecuencias que se transmiten.
- Gracias a la transmisión constante, sin cortes ni parpadeos, provoca que el dispositivo LED excite y conduzca la corriente de manera prácticamente constante. Esto ayuda a reducir el ruido y la corriente no deseada a la señal modulada y por lo tanto aumenta la fiabilidad y la calidad de la señal que se transmite.

A raíz de la modulación CSK, se desarrolló la Modulación Metamérica (MM, *Metameric Modulation*) con la cual se puede lograr mayor eficiencia energética y mayor control de la calidad del color [23].

La particularidad e inconveniente de esta modulación es la necesidad de utilizar un dispositivo LED adicional independiente.

Una aportación más es la Modulación de Intensidad de Color (CIM, *Colour Intensity Modulation*) la cual ayuda a maximizar la capacidad de la comunicación [24].

4. COMPARATIVA ENTRE TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

Como se ha ido mencionando a lo largo del documento, Li-Fi es una de las tecnologías más novedosas y punteras en la investigación actual por sus peculiares características. En la actualidad hay otras tecnologías en uso, las cuales ya se utilizan para la comunicación inalámbrica, que ya se han mencionado anteriormente en este documento, como, por ejemplo, la tecnología de Wi-Fi, el Bluetooth o los infrarrojos. En este apartado se van a desarrollar las ventajas, las desventajas y las similitudes entre la tecnología de Li-Fi y estas otras tecnologías también utilizadas para la transmisión de información. Posteriormente, también se va a citar una idea futura sobre la posibilidad de una red híbrida entre las tecnologías de Li-Fi y Wi-Fi.

4.1 VENTAJAS, DESVENTAJAS Y SIMILITUDES

En la siguiente tabla se realiza una comparación entre distintas tecnologías de comunicación inalámbricas.

	Li-Fi	Wi-Fi	Bluetooth	Infrarrojos
Zona espectral	Luz visible	Radiofrecuencia. Frecuencias: bandas UHF y SHF	Radiofrecuencia. Frecuencias: banda SHF	Infrarrojos
Frecuencia de trabajo	400 – 800 THz	❖ 2.4 GHz ❖ 5 GHz	2.4 GHz	300 GHz – 400 THz
Ancho de banda	Rango de luz visible	▪ 20 MHz ▪ 40 MHz	3 MHz	1 MHz
Velocidad de transmisión	3 Gbps	❖ 130 Mbps ❖ 300 Mbps	1.3 – 24 Mbps	1 Mbps
Distancia máxima	8 m	20 m – 50 m	1 m – 10 m	1 m – 5 m

LOS	Casi estrictamente directa	Indirecta	Indirecta	Estrictamente directa
Seguridad de conexión	Alta	Media	Media	Alta
Función	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Conexión a la red ❖ Interconexión entre dispositivos 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Conexión a la red ❖ Interconexión entre dispositivos 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Interconexión entre dispositivos 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Interconexión entre dispositivos
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mejora de equipo sanitario ▪ Seguridad ▪ Transporte ▪ Aplicaciones similares a las de Wi-Fi en banda ancha 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Descarga de contenido audiovisual ▪ Edición de contenidos en línea ▪ Videoconferencia ▪ Juegos en línea ▪ Almacenamiento en la nube 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Controles remotos ▪ Mandos a distancia ▪ Altavoces y Auriculares 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Mandos a distancia ❖ Periféricos de ordenador

1. COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

Teniendo en cuenta la tabla, se pueden obtener varias conclusiones.

Apreciando la zona espectral en la que se desarrolla cada tecnología, se puede ver que ninguna coincide con el resto, utilizándose rangos del espectro electromagnético distintos.

En cuanto a los datos técnicos de transmisión, se observa que tanto la tecnología de infrarrojos como el Bluetooth no alcanzan ni grandes velocidades de transmisión ni tienen un radio de alcance muy grande, por lo que no son tecnologías inalámbricas propicias para la transmisión de datos [25].

En este caso, la gran comparativa viene dada entre las tecnologías de Li-Fi y Wi-Fi.

Se observa que Wi-Fi tiene un mayor alcance y que no es necesario que tenga línea de visión directa, pero en contrapartida, se ve claramente cómo Li-Fi alcanza una velocidad de transmisión mucho mayor, un mayor ancho de banda y así bien, una mayor seguridad.

En cuanto a LOS, la tecnología de Li-Fi necesita línea directa para una eficiente comunicación, aunque también es cierto que la luz refleja y se propaga en función de los materiales, es por eso que interponer obstáculos entre emisor y receptor puede empeorar bastante la calidad de la transmisión y suponer una gran desventaja en cuanto a la cobertura, pero a su vez puede ser de gran ayuda en cuanto a la seguridad y que la señal no sea muy amplia y clara y que no abarque un mayor rango de distancia necesario, aumentando la dificultad de su detección.

En comparación con Wi-Fi, la tecnología de Li-Fi ayudaría a solventar muchos problemas de seguridad asociados a las redes de banda ancha compartidas y sobrecargadas. También sería más ventajoso Li-Fi en aquellas zonas donde las ondas de radiofrecuencia no llegan y la tecnología de Wi-Fi pierde su cobertura de funcionamiento.

Además de las características anteriores, también mencionar que para el correcto funcionamiento de Li-Fi, es necesario que los emisores de luz estén constantemente encendidos y esto conlleva a la necesidad de tener en todo momento las luces emisoras encendidas. También es posible que en zonas muy iluminadas haya interferencias y la transmisión no sea completamente eficiente al utilizar la tecnología de Li-Fi, por ejemplo, en una sala con mucha luz solar. Las redes Li-Fi pueden lograr un alto rendimiento a cambio de disponer de un alto despliegue de emisores ópticos.

Como se ha mencionado, las redes Li-Fi y Wi-Fi utilizan espectros diferentes sin que se produzcan interferencias entre las comunicaciones, por lo tanto, un trabajo actual y futuro sería unificar las dos tecnologías en un sistema híbrido entre la red Li-Fi y la red Wi-Fi que fuese capaz de lograr las ventajas de cada sistema.

Teniendo en cuenta el estándar IEEE 802.11ad, los dispositivos Wi-Fi pueden funcionar en dos frecuencias centrales distintas: 2.4 GHz y 5 GHz, pudiendo llegar a alcanzar una velocidad de transmisión de datos de hasta 1 Gb/s en algunos casos [26]. A su vez, con la tecnología de Li-Fi se pueden lograr 3 Gb/s utilizándose un

micro-LED [27], y que sería posible llegar a los 100 Gb/s con dispositivos LED láser si se combinan con difusores ópticos logrando una amplia iluminación y emisión [28].

Debido a que en un interior existe la posibilidad de colocar un gran número de puntos de acceso o dispositivos LED sin necesidad de un hardware adicional para la utilización de la comunicación Li-Fi, se puede conseguir un área espectral eficiente (ASE, *Area Spectral Efficiency*) muy alta.

Considerando una red híbrida Li-Fi / Wi-Fi se podría conseguir una comunicación de un gran rendimiento y un gran QoS en un área de cobertura ampliada. La red Li-Fi se beneficiaría de la cobertura en los puntos muertos, en aquellos que quedan sin la emisión directa de la luz, mientras que la red Wi-Fi se beneficiaría de la reducción de las pérdidas en la eficiencia del espectro.

5. ACCESO MULTIUSUARIO

Una de las particularidades de la tecnología Li-Fi es el acceso multiusuario, o también llamada punto-multipunto o multipunto-punto.

Esta característica implica que no necesite de redes heterogéneas, y por lo tanto el usuario pueda estar en movimiento utilizando únicamente la tecnología Li-Fi. Esta técnica hace posible dar acceso simultáneo a una red dotada con varios usuarios, al igual que ocurre con la tecnología de banda ancha inalámbrica.

Destacar que esta técnica es propia de las tecnologías que han sido pensadas para el acceso a redes, como en este caso Li-Fi, o también la tecnología de Wi-Fi.

Una de las tecnologías que más se utiliza es el Acceso Múltiple por División del Espacio óptico (SDMA, *Space Division Multiple Access*) y se lleva a cabo utilizando un transmisor de diversidad angular [29] [30]. Esta diversidad angular hace referencia a múltiples fotodiodos los cuales, cada uno, posee una orientación distinta.

En comparación con la tecnología de Acceso Múltiple por División del Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*), se deduce que la SDMA puede lograr una mejora en el rendimiento de la red 10 veces mayor. Sin embargo, a esta mejora hay que añadirle en contraposición el requerimiento de un cuidadoso diseño en el transmisor y gran consumo que conllevan los algoritmos basados en una búsqueda exhaustiva. Además, también se tiene en cuenta un mayor coste material y la complicación que implica que el área de detección se encuentra dividida entre varios fotodiodos.

La modulación OFDM provee un método para el acceso multiusuario, la Modulación por División de Frecuencias Ortogonales para Acceso Múltiple (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), la cual separa a los usuarios mediante un número de subportadoras ortogonales. Sin embargo, en los sistemas Li-Fi, el canal óptico muestra una gran similitud a la respuesta en frecuencia de un filtro paso bajo, y esto provoca que las subportadoras con las frecuencias más bajas, en general, proporcionen señales con gran relación señal a ruido (SNR, Signal to Noise Ratio) y, por lo tanto, a los usuarios les llega una amplia distorsión. El gran problema de esta modulación recae en el hecho de que el canal óptico es real y positivo. Este problema conlleva que tras realizar la operación hermitica, únicamente se conservan la mitad de las portadoras.

Además de este inconveniente, para poder superar los valores negativos se necesita añadirle una corriente continua, y en algunos casos, recortar la señal. Esta operación suele generar cierto ruido *clipping*, que termina distorsionando en gran medida la señal. Por lo tanto, para poder utilizar las OFDMA es necesario tener en cuenta todo lo explicado y utilizar las técnicas apropiadas para proporcionar y garantizar la equidad a todos los usuarios.

Buscando la mejora en el rendimiento de cara a los usuarios, se propuso NOMA (*Non-orthogonal multiple access*) para los sistemas de comunicación de radiofrecuencia [31]. Mediante la difusión de los dispositivos LEDs, se demostró que se puede mejorar de manera eficiente el rendimiento de una red Li-Fi utilizando NOMA. Adicionalmente, aparte de las técnicas convencionales de acceso múltiple que se utilizan con NOMA, se puede conseguir una mayor conexión de usuarios asignando recursos no ortogonales. Y además se considera NOMA como una tecnología prometedora para las comunicaciones inalámbricas 5G [32].

A continuación, se presentan varios tipos de acceso multiusuario utilizados con la tecnología Li-Fi:

❖ Acceso multiusuario para femtoceldas Li-Fi individuales.

Una femtocelda es una estación base diseñada para dar soporte a hogares o pequeños entornos, por ese motivo son de pequeño tamaño y de potencia reducida. En el entorno de las VLC y de la tecnología de Li-Fi son denominadas *attocells* [33]. La *attocell* se conecta a la red del proveedor del servicio y a partir de esa conexión es capaz de mejorar la cobertura y los servicios de telecomunicaciones en los hogares.

Para este tipo de acceso multiusuario es importante mencionar el principio básico de NOMA, donde el dispositivo LED emite una superposición de mensajes los cuales se destinan a los usuarios interesados e involucrados en la comunicación. Esta superposición de mensajes se envía como una suma de señales, cada una de las cuales tiene un factor de ponderación.

Debido a que la línea de visión, LOS, es en su mayor medida determinista, la calidad de la señal en el canal de comunicación o la relación señal-interferencia más ruido (SINR, *Signal-to-Interference-plusnoise ratio*) pueden variar

significativamente entre diferentes usuarios. Por esta razón, la señal de interferencia se detecta y se cancela en cada receptor. Además, en el proceso de detección de la señal, se consideran como ruido aquellas señales interferentes que tengan menor potencia que la señal real con la información.

Desde un punto de vista más técnico, se considera una transmisión utilizando la tecnología de Li-Fi en una *attocell* individual, donde el punto de acceso óptico o emisor se encuentre en el techo de una habitación y haya K usuarios colocados uniformemente debajo del emisor.

Todos los usuarios se añaden a la comunicación según las condiciones de sus canales tal que $h_1 \leq \dots \leq h_k \leq \dots \leq h_K$, donde h_k se considera la ganancia del canal óptico entre el k-ésimo usuario y el emisor. Para poder equilibrar la velocidad de la transmisión de los datos, independientemente de la ubicación de cada usuario, los parámetros de división de potencia, a_k , se diseñan de tal manera que a los usuarios que tienen los canales con las condiciones menos favorables se les asigne más potencia en la señal tal que $a_1 \geq \dots \geq a_k \geq \dots \geq a_K$, repartiendo la potencia total.

El límite de Shannon (ecuación 3) para la eficiencia espectral para cada usuario, suponiendo que se conoce la información del estado del canal, y el procesamiento de la señal en el receptor, se calcularía de la siguiente manera:

$$\tau_k = \begin{cases} \log_2 \left(1 + \frac{(h_k a_k)^2}{\sum_{i=k+1}^K (h_k a_i)^2 + \frac{1}{\rho}} \right), & k \neq K \\ \log_2 (1 + \rho (h_k a_k)^2), & k = K \end{cases} \quad (3)$$

Donde ρ representa la SNR de la transmisión en el emisor.

Además, NOMA es capaz de mejorar el rendimiento de los usuarios en el borde de la *attocell*, sin deteriorar significativamente el rendimiento de los usuarios con mejor calidad de canal.

❖ Acceso multiusuario para redes de *attocells* Li-Fi.

Las redes de *attocells* funcionan unificando diferentes *attocells* individuales.

Debido a la proximidad y la superposición de las áreas de cobertura de cada emisor, los usuarios ubicados en los límites de las *attocells* sufren una mayor distorsión y se ven afectados por las interferencias de las señales de las celdas adyacentes. El empleo de la técnica de NOMA como se ha descrito no es capaz de mitigar estas interferencias de manera eficiente. Este problema con las interferencias de las células adyacentes se puede aliviar gracias a técnicas de planificación de frecuencias, aunque estas técnicas reducen considerablemente la eficiencia del uso de dicha frecuencia.

Una de estas técnicas prometedora y efectiva propuesta en las redes Li-Fi es la combinación entre NOMA y SDMA. En este caso, se utiliza una técnica de transmisión conjunta de multipuntos coordinados (CoMP, *Coordinated Multi-Point*). Más concretamente, los usuarios ubicados en distintos lugares se sirven simultáneamente con el uso de la transmisión precodificación (TPC, *Transmit Pre-Coding*). A diferencia de SDMA que utiliza un transmisor de diversidad de ángulos, para poder utilizar TPC, es necesario tener conocimiento del canal y poder calcular el precodificador.

Una vez que la señal se ha propagado a través del canal óptico hasta el receptor, se mitiga la interferencia de la señal gracias a SDMA y TPC.

Esta técnica se utiliza únicamente para los usuarios localizados en los bordes de las *attocells* y que sufren de interferencias por ello, es por eso que estas técnicas no repercuten significativamente en el rendimiento habitual de toda la red.

Se puede concluir matizando que el rendimiento de TDMA en una red Li-Fi típica se ve gravemente afectado por las interferencias entre *attocells* adyacentes, y para garantizar un mejor rendimiento hay que utilizar técnicas inteligentes que gestionen las interferencias.

También, como ya se ha mencionado, se puede asegurar que el rendimiento total de una red Li-Fi puede aumentarse considerablemente utilizando las técnicas NOMA y SDMA.

6. ESTANDARIZACIÓN Y MARCO REGULADOR

En este capítulo se va a tratar la normalización y los estándares que rigen a la tecnología de Li-Fi.

En España, los proyectos de telecomunicaciones se rigen según un marco regulador que abarca un conjunto de normas, leyes y organismos, los cuales redactan y sentencian la regulación de los servicios que se proveen gracias a las tecnologías.

6.1 LEYES Y ORGANISMOS

Entre estas leyes y decretos se pueden encontrar los siguientes:

- ❖ Ley General de Telecomunicaciones, del 9 de mayo de 2014, recogida en el BOE [34]. Esta ley transpuso al ordenamiento jurídico español el marco regulador de las comunicaciones electrónicas aprobado por la Unión Europea en el año 2002. Trata de garantizar la aparición y viabilidad de nuevos operadores, la protección de los derechos de los usuarios y la supervisión administrativa de aquellos aspectos relacionados con el servicio público, el dominio público y la defensa de la competencia.

En las últimas modificaciones se introducen en la Ley medidas destinadas a crear un marco adecuado para la realización de inversiones en el despliegue de redes de nueva generación, de modo que se permita a los operadores ofrecer servicios innovadores y tecnológicamente más adecuados a las necesidades de los ciudadanos.

- ❖ Real Decreto 346/2011, de 11 de marzo, por el que se aprueba el reglamento regulador de las infraestructuras comunes de telecomunicaciones para el acceso a los servicios de telecomunicación en el interior de las edificaciones [35].
- ❖ Ley Orgánica 3/2018, del 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales. Esta ley se encarga de la protección de las

personas físicas en lo relativo al tratamiento de sus datos personales y a la libre circulación de ellos [36].

Entre los distintos organismos de estandarización y regulación se pueden encontrar los mencionados a continuación:

- ❖ Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE). Esta asociación de ingenieros se dedica a la normalización y el desarrollo en áreas técnicas a nivel mundial. No se encargan de normalizar, ya que no poseen potestad para ello, pero sí proponen distintas normas y estándares. Su objetivo es promover la creatividad, el desarrollo y la integración, compartir y aplicar los avances en las tecnologías de la información, electrónica y ciencias en general para beneficio de la humanidad y de los mismos profesionales [37].
- ❖ Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Este organismo se encarga de la estandarización de las telecomunicaciones a nivel internacional entre las distintas administraciones y empresas operadoras. Está especializada en las telecomunicaciones de la ONU [38].
- ❖ Conferencia Europea de Administraciones de Postales y Telecomunicaciones (CEPT). Este es un organismo internacional, del que son miembros 48 países actualmente, que se encarga de proponer normas legales, de la regulación del mercado y las políticas europeas comunes en materia de comunicación [39].
- ❖ Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC). Este organismo es el encargado de la estandarización en las áreas de ingeniería eléctrica a nivel europeo [40].
- ❖ Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (ETSI). Esta organización se ocupa de la estandarización dentro de la industria de las telecomunicaciones a nivel europeo [41].
- ❖ Organismo de Reguladores Europeos de las Comunicaciones Electrónicas (BEREC). Es el organismo encargado de la regulación del mercado de las telecomunicaciones a nivel europeo [42].

- ❖ Asociación Española de Normalización (AENOR). Esta asociación está dedicada al desarrollo de la normalización y la certificación en todos los sectores industriales y de servicios. Es una entidad líder en certificación de sistemas de gestión, productos y servicios, y responsable del desarrollo y difusión de las normas UNE [43].
- ❖ Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC). Esta organización se encarga de preservar, garantizar y promover el correcto funcionamiento de todos los mercados de España. Regula la existencia de una competencia efectiva en todos los sectores productivos en beneficio de los consumidores y usuarios [44].

6.2 ESTÁNDARES

El comité de estandarización IEEE 802 ha desarrollado una serie de estándares para el acceso en las diferentes redes inalámbricas según sus respectivos rangos de cobertura. Estos estándares se centran en las capas físicas y de acceso (MAC) [5]:

- ❖ IEEE 802.11 para redes de área local (WLAN, *Wireless Local Area Network*).
- ❖ IEEE 802.15 para redes de área personal (WPAN, *Wireless Personal Area Network*).
- ❖ IEEE 802.16 para redes de área metropolitana (WMAN, *Wireless Metropolitan Area Network*).
- ❖ IEEE 802.20 para redes de área extensa (WWAN, *Wireless Wide Area Network*).

En este caso, el estándar que abarca la regularización y la normalización de la tecnología de Li-Fi es el IEEE 802.11. El comité de estandarización IEEE 802.11 de comunicaciones ópticas ha estado trabajando con diferentes fabricantes, operadores y usuarios finales en un estándar para las comunicaciones ópticas dentro de las redes de área local LAN [45]. Este nuevo proyecto es el “*IEEE 802.11bb Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between*

Systems Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment: Light Communications.”. Como su nombre indica, este estándar IEEE 802.11bb está pensado para las telecomunicaciones y el intercambio de información entre los sistemas de redes de área metropolitana y local.

Nikola Serafimovski, miembro del comité y asociación de estándares IEEE, presidente del grupo de trabajo IEEE 802.11bb, dice *“Li-Fi is the future of communications, with the potential to become a real mass-market technology”*. [46] (Li-Fi es el futuro de las comunicaciones, con el potencial de convertirse en una verdadera tecnología en el mercado a gran escala)

Al igual que también comenta: *“But to have mass-market growth, a standard is needed. Similar to what wireless communications development went through, Li-Fi must go through it as well”*.

(Pero para tener un crecimiento en el mercado a gran escala, se necesita un estándar. Similar a lo que ocurrió con el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas, Li-Fi debe pasar por eso de la misma manera)

Teniendo en cuenta las palabras de Serafimovski, se puede encontrar cierto sentido en el hecho de que el IEEE desarrolle el estándar para la regulación de la tecnología de Li-Fi basándose en el estándar ya considerado para la tecnología de Wi-Fi, el 802.11. Después de más de 25 años desde que se consideró el estándar 802.11, se intenta mejorar y completar incluyendo la normativa y la regularización para la tecnología de Li-Fi.

Según Serafimovski *“IEEE 802.11 has developed the world’s single most successful wireless communication standard”*.

(IEEE 802.11 ha desarrollado el estándar de comunicación inalámbrica más exitoso del mundo)

Un dato representativo que sustenta la idea de Serafimovski es que, según Cisco Virtual Network, uno de los mayores líderes mundiales de las redes y las telecomunicaciones, recogió que, en 2017, los datos inalámbricos que fueron enviados a través de la red utilizando la tecnología de Wi-Fi representaron más de un 54% de los datos totales de todas las comunicaciones inalámbricas. Serafimosvki apunta que hay diferencias entre lo que se puede llegar a obtener de la tecnología de Li-Fi y de lo que se puede conseguir a partir de la parte inferior del espectro de radiofrecuencias.

“Li-Fi is another tool in a set that already happens to be pretty good. It will provide that complementary capacity that Wi-Fi and other wireless communications need to create a fully connected digital society”, (Li-Fi es otra herramienta en un conjunto que ya es bastante bueno. Proporcionará la capacidad complementaria que necesitan Wi-Fi y otras comunicaciones inalámbricas para crear una sociedad digitalmente conectada) dice Serafimovski.

El objetivo de este proyecto IEEE 802.11bb es que esté completo en el año 2021. Sin embargo, los primeros proyectos relacionados con la tecnología de Li-Fi podrían registrarse por versiones anteriores del estándar hasta la llegada de esa fecha [47].

En la actualidad, la tecnología de Li-Fi utiliza el espectro de luz visible que no se encuentra regulado, por lo que no es necesaria la obtención de ninguna licencia para trabajar con ello.

A continuación, se va a pasar a explicar el estándar que se encuentra actualmente definido y a partir del cual se contemplará e incluirá la tecnología de Li-Fi, el estándar IEEE 802.11. Este estándar define las capas físicas y del control de acceso al medio de las redes inalámbricas WLAN.

El estándar ha ido evolucionando a medida que han pasado los años y se han ido actualizando y mejorando las tecnologías de comunicación inalámbrica [48]:

- ❖ En 1997 se publicaron las primeras versiones del estándar 802.11, las cuales marcaban unas velocidades máximas de hasta 2Mbps/s. Tras esta versión se siguieron añadiendo mejoras adicionales para mejorar la seguridad, la calidad del servicio, así como la velocidad de acceso.
- ❖ En 1999 llegó el estándar 802.11b el cual consideraba una velocidad de hasta 11Mbps/s.
- ❖ El estándar 802.11c el cual especifica distintos métodos para la comunicación inalámbrica
- ❖ Posteriormente apareció el 802.11d que permite el uso de las redes locales en el ámbito internacional.

- ❖ En el estándar 802.11e se recurre a la posibilidad de operar en entornos domésticos y laborales.
- ❖ Más tarde se desarrolla el 802.11f donde se empieza a considerar el cambio de punto de acceso para los usuarios en movimientos. Mas adelante se le conocería como '*roaming*'.
- ❖ En 2003 aparece el estándar 802.11g considerando velocidades de hasta 54 Mbits/s.
- ❖ El estándar 802.11h intenta resolver algunos problemas encontrados con las comunicaciones entre satélites y radares.
- ❖ En el año 2004 se publicaba el estándar 802.11i que incluía ciertas mejoras en la seguridad de la comunicación.
- ❖ En 2007 se recapitularon todas las versiones publicadas anteriormente en un único documento, el estándar IEEE 802.11-2007 mientras se seguían considerando mejoras y avances para dicho estándar.

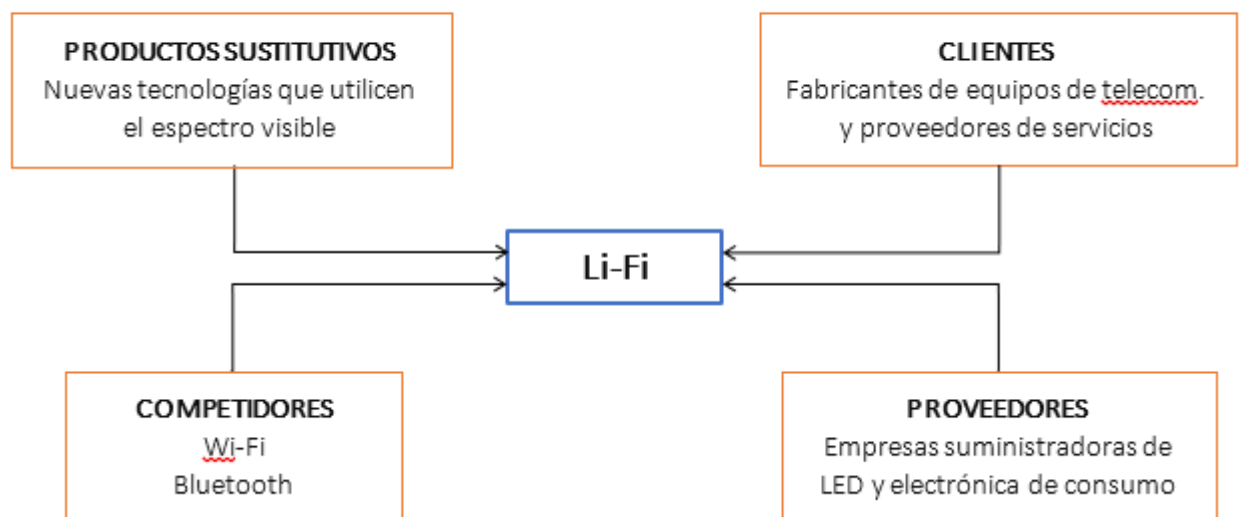
7. IMPACTO SOCIO-ECONÓMICO

En este punto se va a realizar un análisis de la tecnología de Li-Fi desde el punto de vista tecnológico y en referencia a las tecnologías presentes en el mercado actual. Para ello se va a realizar una adaptación del análisis estratégico de mercados de Porter, basado en las denominadas 5 fuerzas de Porter [49], al entorno de la tecnología de Li-Fi, la cual se encuentra en proceso de desarrollo.

El análisis de Porter es un modelo estratégico por el cual se estudia el efecto que puede llegar a tener un producto en el mercado y a partir del mismo se puede establecer un modelo de negocio. Este análisis consiste en el estudio de las competencias horizontales (pertenecientes al mismo mercado, a la misma línea de negocio) y de las competencias verticales (pertenecientes a distintos ámbitos de negocio). Dentro de las competencias horizontales, se realiza el estudio concreto de 2 fuerzas, que son los productos sustitutivos y la propia rivalidad de la competencia actual. Con respecto a las competencias verticales, se analizan las otras 2 fuerzas, es decir, el poder de negociación de los proveedores y el poder de negociación con los clientes.

COMPETENCIAS HORIZONTALES

COMPETENCIAS VERTICALES



6. ANÁLISIS ESTRATÉGICO DE LA TECNOLOGÍA LI-FI (ADAPTACIÓN DE PORTER)

❖ Productos o tecnologías sustitutivas.

Como se ha mencionado, Li-Fi es una tecnología en proceso de estudio y avance, por lo que es complicado encontrar productos o tecnologías que puedan sustituirle o hacer cábalas acerca de esta problemática.

Actualmente en el mercado en el que compite la tecnología de Li-Fi se encuentra la otra gran tecnología que se utiliza para las transmisiones inalámbricas, Wi-Fi. Debido a que es una tecnología ampliamente implantada en la actualidad se enmarca dentro de la categoría de tecnologías competidoras establecidas en vez de en las de sustitución.

Teniendo en cuenta la comparativa entre diferentes tecnologías que se realizó en el cuarto capítulo, se podrían considerar el resto de tecnologías, como el Bluetooth o los infrarrojos, como posibles amenazas dentro del sector.

Aunque Li-Fi podría llegar a sustituir a estas tecnologías, no son una competencia muy amenazadora ya que no compiten directamente en el mismo mercado y no ofrecen las mismas prestaciones, pero aun así son tecnologías que pueden competir en ciertos aspectos con Li-Fi.

Desde el punto de vista de las prestaciones, la mayor ventaja y característica de la tecnología de Li-Fi es el uso del rango visible del espectro electromagnético para la transmisión y la comunicación inalámbrica. Es por esa razón, que las grandes amenazas futuras para Li-Fi serían las nuevas tecnologías que intentaran utilizar y aprovechar también el rango visible del espectro electromagnético. Si estas tecnologías tuviesen el objetivo de lograr transmisiones y comunicaciones inalámbricas, al igual que la tecnología de Li-Fi, serían una competencia directa.

Así bien, una posible tecnología sustitutiva podría ser una desarrollada a partir del Bluetooth, que llegara a igualar o mejorar las ventajas que puede ofrecer Li-Fi. Si la tecnología de Bluetooth avanzase y llegase a competir en el mismo campo que Li-Fi por una transmisión a grandes velocidades y a cortas distancias, podría llegar a ser una amenaza de sustitución, pero es una solución bastante remota, y que no conseguiría ser muy competitivo en lo relativo al ancho de banda.

❖ Competencia en el sector.

Teniendo en cuenta el sector en el que actúa la tecnología de Li-Fi, la mayor competencia que amenaza su éxito es la tecnología de Wi-Fi.

Wi-Fi es la tecnología actual más utilizada para la comunicación inalámbrica. Es una tecnología relativamente barata y de la cual se puede beneficiar casi cualquier dispositivo electrónico. Prácticamente todo el tráfico de transmisión inalámbrica y acceso a la red se lleva a cabo gracias a la tecnología de Wi-Fi. Como se ha mencionado en el presente trabajo, las tecnologías de Wi-Fi y Li-Fi podrían convivir y beneficiarse la una de la otra, debido a sus características suplementarias. Aún dicho lo cual, cabe mencionar que toda tecnología pretende implantarse por encima del resto, como única e innovadora, y es por eso que, con un mayor estudio y avance, la tecnología de Li-Fi pretende competir directamente con la tecnología de Wi-Fi.

❖ Poder de negociación de los proveedores.

En cuanto al poder de negociación que recae en los proveedores se puede destacar el interés de las empresas que obtendrían beneficios vendiendo sus productos de hardware a las empresas destinadas al desarrollo de la tecnología de Li-Fi.

Ejemplos de estos proveedores serían las empresas cuyo objetivo es fabricar y vender dispositivos LED. Estas empresas se verían muy beneficiadas con la entrada de Li-Fi en el mercado actual, haciendo falta aprovisionar de dispositivos LED todos aquellos escenarios donde se implantara esta tecnología. En concreto, estarían muy a favor de cambiar todo el alumbrado de las calles y transportes por tecnología LED para la posibilidad de dar salida a la tecnología Li-Fi. Así bien, existen muchas empresas destinadas a este fin, por lo que, en el mercado actual, la tecnología de Li-Fi no tendría mayores problemas a la hora de salir a producción y el poder de negociación de dichos proveedores no sería muy notorio.

Al igual que ocurre con los proveedores encargados de proporcionar dispositivos LED, se podría comentar una línea de pensamiento similar para cualquier dispositivo electrónico que fuese necesario para la implantación de la tecnología de Li-Fi. Los componentes electrónicos necesarios para este tipo de tecnología no deberían ser muy novedosos ni muy difícil de conseguir, por lo que, de nuevo, no existiría mayor problema a la hora de elegir los proveedores de los materiales necesarios para llevarla a cabo.

Aún con esta información, cabe destacar que la parte novedosa de esta tecnología recae en los desarrollos de los equipos de transmisión y recepción, y estos equipos, en principio, sólo los podrían desarrollar los fabricantes que

tuvieran acceso a ese conocimiento o incluso a las posibles patentes que se pudieran conceder.

❖ Poder de negociación de los clientes.

Con respecto a los clientes que pudieran estar interesados en la tecnología de Li-Fi se pueden encontrar varias opciones.

Las empresas que se encargan de manejar la tecnología de Wi-Fi, las grandes empresas de telecomunicaciones, podrían estar interesadas en añadir a sus proyectos las ventajas que proporciona Li-Fi. También podrían estarlo las empresas que se encargan de diseñar dispositivos electrónicos, los cuales deberían acondicionarse para poder soportar dispositivos LED y funcionar con la tecnología de Li-Fi.

Aprovechando las infraestructuras de iluminación ya existentes, la tecnología Li-Fi necesitaría sustituir todas esas luces por emisores LED y provisionarlas de la circuitería necesaria para hacer posible la transmisión, es por esta razón que las empresas encargadas de diseñar todas estas infraestructuras lumínicas podrían aceptar cambiarlas por emisores LED y ver beneficiosa la entrada al mercado de Li-Fi.

Al igual ocurre con las empresas que se encargan de aprovisionar los dispositivos electrónicos para que funcionen con Bluetooth, podrían optar por sustituir el Bluetooth por el Li-Fi o incluso compaginar las dos tecnologías en un mismo dispositivo.

En la actualidad, el sector que abarca las tecnologías de las comunicaciones inalámbricas ha crecido notablemente y la mayor parte de la población mundial posee algún dispositivo que las utilice, ya sean smartphones, tablets, etc. Es por este motivo que, si este producto se integrara en esos dispositivos, estaría destinado a la mayor parte de la población mundial. Los clientes interesados en la tecnología de Wi-Fi podrían también estar interesados en Li-Fi, como un producto sustitutivo o como un producto complementario.

También podrían estar interesados aquellos clientes que utilicen dispositivos electrónicos dotados de emisores LED, sólo sería necesario aprovisionarlos de la tecnología Li-Fi para poder hacer uso de ella. Al igual que pasa con la infraestructura eléctrica doméstica, se podría aprovechar para el uso de esta tecnología sustituyéndola por dispositivos LEDs y así mantener una red conjunta y aprovechar la iluminación ya instalada para la conexión y la transmisión de datos.

Aprovechando la lógica que utilizan algunas empresas para utilizar el uso de internet como método para hacer estudios y marketing, podría considerarse el estudio del uso de la luz en un entorno doméstico a través del uso de Li-Fi. De esta manera se podría realizar un estudio cuantificable del tiempo que se utiliza la luz en un entorno doméstico, y cuánta de esa luz se utilizaría para iluminar y cuanta para el uso de la red.

Al igual que ocurre con la tecnología de Wi-Fi actualmente, podría ofrecerse en lugares públicos, como centros comerciales, transporte público, centros de restauración...una conexión a internet gratuita, en este caso utilizando la tecnología de Li-Fi, que como se ha visto en el presente proyecto, para distancias cortas y directas, la velocidad de transmisión de datos es mucho mayor que la que se consigue con la tecnología de Wi-Fi.

Las comunicaciones inalámbricas han tenido un gran impacto beneficioso en la sociedad actual. Han facilitado en gran medida la vida cotidiana, haciendo posible la conexión entre usuarios y con la red en casi cualquier lugar y en cualquier momento. El profesor Harald Haas indicó, en su primera conferencia "*Wireless data from every light bulb*" [9], el impacto social y económico que tendría la tecnología de Li-Fi en la actualidad y en el futuro más próximo. Haas resaltó una serie de datos que reflejaban claramente el beneficio que supondría implantar la tecnología de Li-Fi en la sociedad actual.

Actualmente existen alrededor de 1.4 millones de antenas que actúan como estaciones base para la conectividad con la red y la mayor parte de la energía que consumen es utilizada en su propia refrigeración, en lugar de la transmisión y la conectividad. A su vez existen más 5000 millones de dispositivos electrónicos capaces de conectarse entre sí y con la red. Con todos estos dispositivos, se llegan a transmitir más de 600 TBytes de datos en un mes. Con esta cantidad de datos transmitidos, y las limitaciones que ofrece el rango de las ondas de radiofrecuencia en el espectro electromagnético se ve necesario un cambio en la manera de realizar las comunicaciones inalámbricas. También se cuenta en la actualidad con alrededor de 14 millones de dispositivos capaces de emitir luz, como focos incandescentes o lámparas fluorescentes. En cuanto al rango visible del espectro electromagnético, se puede asegurar que es 10000 veces mayor que el rango de las radiofrecuencias que se utiliza para las comunicaciones inalámbricas [9].

Con todos estos datos, el profesor Haas expuso el gran beneficio que supondría el hecho de dejar de mantener las caras e ineficientes estaciones base, y modificar toda la infraestructura lumínica ya construida dotándola de dispositivos LED y de la circuitería necesaria para la utilización de Li-Fi. Así bien, es necesario destacar que para la utilización de esta tecnología y para la transmisión, es necesario que la fuente de envío de la información se encuentre constantemente encendida y en contacto permanente con el receptor. Esta característica podría verse afectada por un alto nivel de consumo eléctrico. En el caso de que esa luz sea utilizada únicamente para la comunicación y no para alumbrar, supondrá un gasto extra de electricidad para el consumidor.

La sociedad actual contempla las comunicaciones inalámbricas como un servicio público, casi al mismo nivel que la electricidad o el agua, y de esta manera se podría beneficiar a la misma vez, de la iluminación que le ofrecen los emisores de luz, en este caso los dispositivos LED, y de la conexión inalámbrica que ofrece la tecnología de Li-Fi.

Según un estudio de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, Environmental Protection Agency), y recapitulando todos estos datos y teorías, se puede asegurar que la demanda del uso de la red de datos y la conectividad de los usuarios está creciendo a un ritmo exponencial.

Tras lo anunciado por el profesor Haas en su conferencia, también es de esperar que los dispositivos LED acaben remplazando poco a poco a la gran infraestructura lumínica que existe en la actualidad, las lámparas fluorescentes o los focos incandescentes. A su vez, Global Market Insights, una compañía global de consultoría y gestión de mercados, prevé que para el año 2023, el mercado en el que competirá la tecnología de Li-Fi tendrá un valor de 76 mil millones de dólares americanos (67 mil millones de euros). Por este motivo, aseguran, que la tecnología de Li-Fi es una buena apuesta futura [50].

8. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO

En este capítulo se va a exponer la planificación que se ha llevado a cabo para dar lugar a este proyecto, detallando las distintas fases que se han ido siguiendo. A su vez, se analizará y calculará un posible presupuesto formado por todos los costes que han derivado de este trabajo.

El proyecto fue diseñado y planificado para realizarlo durante seis meses, pero por problemas de compatibilidad entre la realización de este proyecto y la situación laboral del alumno, se tomó la decisión de realizarlo durante todo el año 2018. Por este motivo, los cálculos en el presupuesto se realizarán teóricamente como si se hubiese realizado en los seis meses inicialmente planificados.

A continuación, se van a detallar las distintas fases que ha atravesado este proyecto.

- ❖ En primer lugar, se acordó junto con la tutora el tema general del trabajo. Se llegó a un acuerdo mutuo de realizar un estudio y análisis tecnológico, económico y regulatorio acerca de la prometedora tecnología de Li-Fi.
- ❖ Tras concretar el tema del trabajo se pasó a la creación de un índice, el cual fue modelado y diseñado entre el alumno y la tutora hasta alcanzar el resultado final.
- ❖ Una vez que el trabajo estuvo dividido en secciones, contemplando todos los puntos acordados y en el orden adecuado, se pasó a la búsqueda de información. Este punto fue el más complejo y al que se le dedicó más tiempo, ya que el tema de este proyecto está en constante avance y desarrollo y la información no es abundante por lo que se necesita una búsqueda más profunda y exhaustiva.

A su vez, para poder realizar esta búsqueda de información con cierto sentido, era necesario entender bien el objetivo del trabajo, las necesidades que requería dicha investigación, así como las problemáticas encontradas y los análisis realizados.

- ❖ Después de haber recopilado la mayor parte de la información, se pasó a desarrollar la memoria, ordenando toda la información y realizando los análisis correspondientes.
- ❖ Cada cierto tiempo que el trabajo iba tomando forma, la tutora realizaba correcciones, añadía su opinión y aportaba sus ideas para aumentar la solidez y robustez del proyecto.

Es necesario puntualizar que los últimos tres puntos se alternaron en diversas ocasiones ya que la búsqueda de información se realizó de forma prácticamente continua, a la vez que se desarrollaba la memoria y se iba completando todo el trabajo, al igual que se iban incorporando las correcciones y los consejos de la tutora.

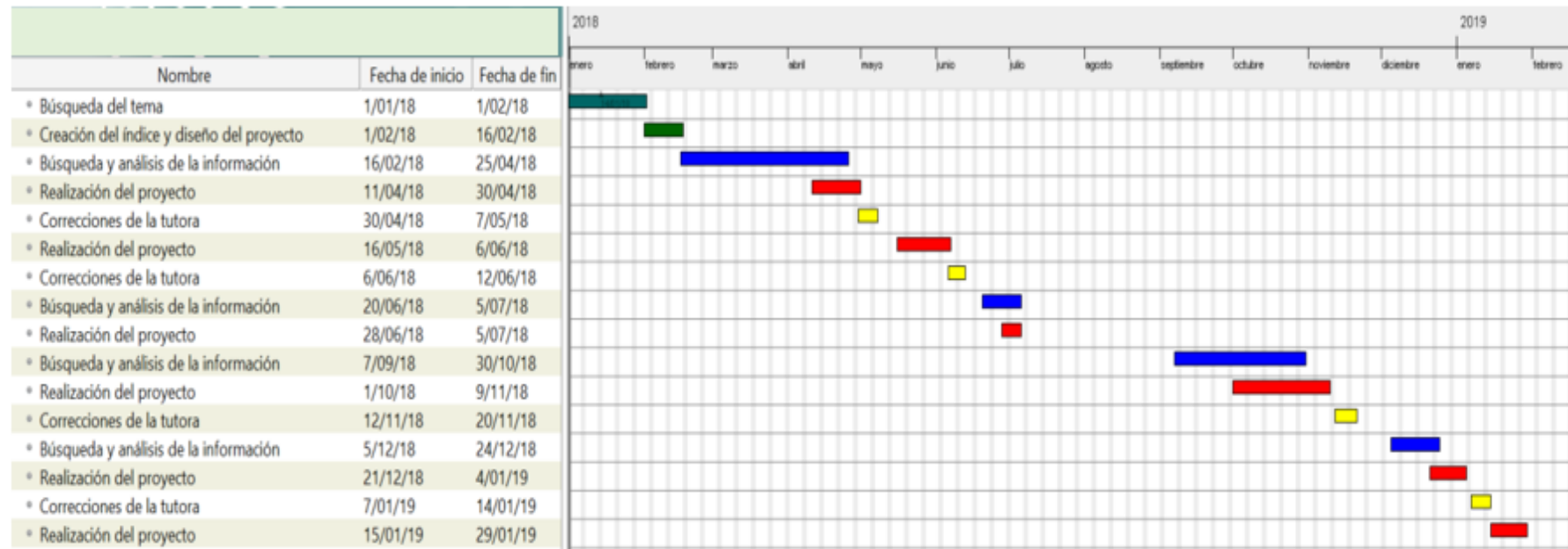
En este punto se va a mostrar la planificación y la realización del proyecto a lo largo del tiempo requerido mediante un diagrama de Gantt (figura 7).

Llegados a este punto se va a realizar el análisis y el cálculo de un presupuesto a partir de los recursos utilizados para realizar este proyecto.

En primer lugar, se va a calcular un presupuesto dedicado a las personas implicadas en este proyecto. Se dedicará un sueldo de ingeniero junior al autor del presente trabajo, Álvaro Caballero Pamos, de 13€/hora. Teniendo en cuenta las horas trabajadas por el alumno, alrededor de unas 463 horas, hace un total de 6019€. A su vez se dedicará un sueldo de ingeniera senior a la tutora dedicada a la supervisión de este proyecto, Raquel Pérez Leal, de 30€/hora. Contando su aportación en el proyecto se pueden considerar alrededor de 37 horas colaborando en este proyecto. Con estos datos se calcula un total de 1110€ dedicado a la tutora encargada del proyecto.

En cuanto a todos los recursos materiales destinados y utilizados en este proyecto se destacan los siguientes:

- ❖ Un ordenador portátil Lenovo Thinkpad E580, con un valor de 580€.
- ❖ Un ordenador de sobremesa, dotado de CPU, monitor y periféricos, con un valor total de 940€.



7. DIAGRAMA DE GANTT

Teniendo en cuenta las tasas de amortización lineal en España [51] consideradas para este proyecto, el coste final de estos gastos materiales resultaría de aplicarle el 25% del coste total por cada mes utilizado. De esa manera el valor de cada recurso material va disminuyendo cada mes el 25%.

Considerando el software utilizado se añade Microsoft Office 365. En este caso se ha utilizado una licencia gratuita por lo que este software no ha supuesto ningún gasto adicional al presupuesto de este proyecto.

Atendiendo a otros gastos, se tiene en cuenta el coste de luz e internet durante el período de realización del trabajo. Aunque el tiempo total se ha alargado a un año, el tiempo efectivo se reduce a seis meses. Por ese motivo se estima un gasto de internet de 50€/mes y un gasto de luz de 30€/mes. Este cálculo hace un gasto total de luz e internet durante los 6 meses efectivos de 480€.

	Coste unitario	Horas trabajadas	Meses trabajados	Tasa de amortización	Coste total
Alumno	13€/hora	463			6019€
Tutora	30€/hora	37			1110€
Ordenador portátil	580€		6	25%	104€
Ordenador de sobremesa	940€		6	25%	168€
Microsoft Office 365	0€		6	33%	0€
Luz	30€/mes		6		180€
Internet	50€/mes		6		300€
Total					7881€

2. PRESUPUESTO

Como se puede observar en la tabla, contando con los costes relacionados a los recursos humanos, que ocupan el mayor gasto, los recursos materiales utilizados para

desarrollar este proyecto, y la infraestructura de luz e internet, se alcanza un presupuesto total necesario para realizar este proyecto, durante los seis meses efectivos, de 7881 euros.

9. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este último capítulo se va a dedicar a exponer y justificar todas las conclusiones obtenidas durante la realización de este trabajo. Además, se va a completar explicando algunas alternativas que se podrían utilizar como continuación en un futuro en relación al tema tratado en este trabajo.

La primera y más clara conclusión a la que se llega con este análisis es la idea equivocada de que la tecnología de Li-Fi se desarrolle con el objetivo de sustituir a la tecnología de Wi-Fi. En el capítulo 4, se realiza un estudio comparativo donde puede observarse que estas dos tecnologías pueden llegar a ser totalmente compatibles y convivir sin problemas la una con la otra. Como se observa en esa tabla, tanto el Bluetooth como los infrarrojos, son tecnologías utilizadas para las comunicaciones inalámbricas pero el dato determinante es la función de la conectividad de la red, donde la tecnología de Li-Fi lo comparte con la de Wi-Fi. Por este motivo, se puede llegar a pensar en el desarrollo de Li-Fi para la futura sustitución de Wi-Fi; pero analizando el resto de datos, se comprueba que Wi-Fi puede ser utilizado y es más ventajoso para distancias más largas y sin necesidad de mantener la línea directa de visión, y que la tecnología de Li-Fi puede mejorar considerablemente la velocidad de transmisión en las distancias cortas, en los escenarios donde no sea un problema la necesidad de tener la línea de visión directa y la luz del emisor encendida.

Estos datos corroboran que, en un entorno cotidiano, ya sea un hogar, una oficina, etc, pueden convivir sin problemas ambas tecnologías, utilizando Li-Fi en las salas en ausencia de movimiento, y Wi-Fi para los momentos de desplazamiento por todo el entorno.

Destacar que para la utilización de la tecnología de Li-Fi, como se ha mencionado, es necesario tener la luz encendida en todo momento que se quiera mantener la conexión. De cara al usuario, este hecho conlleva un aumento del consumo eléctrico, y por lo tanto un mayor gasto, siempre que el uso de la luz sea únicamente para la comunicación y no para la iluminación.

Otro punto a destacar es que esta tecnología aún está en progreso de desarrollo y avance. Este es un punto muy importante ya que significa que gran parte de lo explicado en este trabajo podría ser mejorado y ampliado según la tecnología avanzase. También en relación a este tema, hay que considerar que la regulación

encargada de estandarizar esta tecnología también está en proceso de desarrollo, y es por ese motivo que aún no se ha lanzado al mercado. Por este mismo motivo, todas las aplicaciones mencionadas en el trabajo, actualmente son únicamente ideas, al no estar esta tecnología implementada en ningún entorno que no sean más que laboratorios de pruebas.

Por otra parte, habría que apuntar que la aplicación que más interés suscita, la de poder aprovisionar todo el conglomerado de luminaria existente a día de hoy con la tecnología Li-Fi para poder estar comunicado casi en cualquier lugar, siempre que haya una luz encendida, es el más remoto. En efecto, el despliegue actual de dispositivos y electrónica necesarios para llevar a cabo esta tecnología es prácticamente nulo, y conllevaría un gasto de grandes dimensiones, de dinero, de tiempo y de esfuerzo, así como la conexión entre las luminarias.

En lo referente a los trabajos futuros, hay dos alternativas posibles muy definidas. Por un lado, podría completarse todo este estudio y análisis con la información más actual de la tecnología Li-Fi según fuese avanzando, se fuese regulando y se fuese lanzando al mercado. Por este lado sería un trabajo prácticamente constante y en paralelo a medida de los nuevos avances y las actualizaciones del estado de la tecnología.

Por otro lado, se encuentra la posibilidad de plantear y desarrollar una pequeña demostración, en la que, por ejemplo, se centrara el objetivo en la reproducción de un vídeo a través de la luz gracias a la tecnología Li-Fi o también, otro ejemplo, poder llegar a enviar un mensaje de un dispositivo y recibirlo en otro totalmente correcto.

Otra posibilidad en cuanto a los desarrollos y avances futuros relacionados con esta tecnología sería el planteamiento y la definición de los escenarios tipificados de despliegue para distintas aplicaciones. Estas aplicaciones podrían deducirse de las descritas en este trabajo, como por ejemplo diseñar un pequeño entorno laboral o una simplificación de un entorno doméstico donde se utilizase el acceso a la red mediante la tecnología de Li-Fi con varios usuarios. También aplicar esta tecnología contemplada en este ejemplo con el objetivo de la conectividad y comunicación entre distintos dispositivos electrónicos. En este posible trabajo futuro sería necesario calcular el equipamiento requerido para cada escenario tipificado en función de unas prestaciones concretas.

Así bien, también se podrían realizar distintos escenarios similares, con el mismo objetivo, pero con diferentes características, y concluir con una evaluación económica comparativa utilizada para posibles estudios de diseño de redes Li-Fi.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Área tecnología. Nuevas tecnologías. Li-Fi,» 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.areatecnologia.com/>. [Acceso en Febrero, 2018]
- [2] «Ciencia en San Miguel Séptimo. Efecto fotoeléctrico y espectro de luz visible,» Agosto 2017. [En línea]. Disponible en: <http://cienciaensanmiguelseptimo.blogspot.com/>. [Acceso en Febrero, 2018]
- [3] «Techlandia,» 2015. [En línea]. Disponible en: <https://techlandia.com/>. [Acceso en Febrero, 2018]
- [4] «Redes zone,» 11 Mayo 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.redeszone.net/>. [Acceso en Marzo, 2018]
- [5] M. Álvarez-Campana, J. Berrocal, F. González, R. Pérez, I. Román, E. Vázquez, «Tecnologías de banda ancha y convergencia de redes,» 2009.
- [6] «Visible Light Communications.,» 4 Junio 2013. [En línea]. Disponible en: <http://visiblelightcomm.com/>. [Acceso en Febrero, 2018]
- [7] «Network World. Comunicaciones ópticas inalámbricas,» 1 Mayo 2001. [En línea]. Disponible en: <http://www.networkworld.es/>. [Acceso en Marzo, 2018]
- [8] H. Haas, «What is Li-Fi?,» *Journal of lightwave technology*, vol. 34, nº 6, 15 Marzo 2016.
- [9] H. Haas, «Wireless data from every light bulb,» 2011.
- [10] H. H. Silven Dimitrov, Principles of LED Light Communications, Cambridge University Press, 2015.
- [11] «Li-Fi, la novedosa tecnología de comunicación,» 12 Junio 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.e-park.es>. [Acceso en Mayo, 2018]
- [12] «A la velocidad de la luz: Internet a través de bombillas LED (LiFi),» [En línea]. Disponible en: <https://www.pinterest.es>. [Acceso en Mayo, 2018]
- [13] «Network RTK for Intelligent Vehicles,» 1 Febrero 2013. [En línea]. Disponible en:

<http://www.gpsworld.com>. [Acceso en Junio, 2018]

- [14] D. R. Brown, «Global Visible Light Communications (VLC) Market,» 19 Marzo 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.firstnewsservice.com>. [Acceso en Junio, 2018]
- [15] J. M. Kahn, J. R. Barry, «Wireless infrared communications,» vol. 85, no. 2, Febrero 1997
- [16] IEEE Std. 802.15.7-2011, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Parte 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, IEEE Std., 2011.
- [17] R. Mesleh, H. Elgala, H. Haas, «Optical spatial modulation,» IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 3, no. 3, Marzo 2011
- [18] F.-M. Wu, C.-T. Lin, C.-C. Wei, C.-W. Chen, H.-T. Huang, C.-H. Ho, «1.1-Gb/s white-LED-based visible light communication Employing carrier-less amplitude and phase modulation, » IEEE Photonics Technology Letters, vol. 24, no. 19, Octubre 2012.
- [19] T. Komine, S. Haruyama, M. Nakagawa, «Performance evaluation of narrowband OFDM on integrated system of power line communication and visible light wireless communication,» International Symposium Wireless Pervasive Computing, Enero 2006.
- [20] M. Z. Afgani, H. Haas, H. Elgala, D. Knipp, «Visible light communication using OFDM ,» 2nd International Conference on Testbeds Research Infrastructure for the Development of Networks and Communities, 2006.
- [21] M. Noshad, M. Brandt-Pearce, «Hadamard coded Modulation: An alternative to OFDM for wireless optical communications,» IEEE Global Communications Conference, Diciembre 2014.
- [22] E. Monteiro, S. Hranilovic, «Constellation design for color-shift keying using interior point methods,» IEEE Globecom Workshops, Diciembre 2012.
- [23] P. M. Butala, J. C. Chau, T. D. C. Little, «Metameric modulation for diffuse visible light communications with constant ambient lighting,» International Workshop

Optical Wireless Communication, Pisa, Italia, Octubre 2012.

- [24] K.-I. Ahn, J. K. Kwon, «Color intensity modulation for multicolored visible light communications,» IEEE Photonics Technology Letters, vol. 24, no. 24, Diciembre 2012.
- [25] «Enterpirse Wifi System» Septiembre 2018. [En línea]. Disponible en: <https://slideplayer.es/>. [Acceso en Noviembre, 2018]
- [26] C. Hansen, «WiGig: Multi-Gigabit wireless communications in the 60 GHz band,» IEEE Wireless Commun., vol. 18, no. 6, Diciembre 2011.
- [27] D. Tsonev, H. Chun, S. Rajbhandari, J. McKendry, S. Videv, E. Gu, M. Haji, S. Watson, A. Kelly, G. Faulkner, M. Dawson, H. Haas, D. O'Brien, «A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED,» IEEE Photonics Technology Letters, vol. 26, no. 7, Abril 2014.
- [28] D. Tsonev, S. Videv, H. Haas. (Enero 2015). Towards a 100 Gb/s visible light wireless access network. [En línea]. Disponible en: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-23-2-1627> [Acceso en Octubre, 2018]
- [29] Z. Chen and H. Haas, "Space division multiple access in visible light communications," IEEE International Conference of Communications, London, United Kingdom, Junio 2015.
- [30] Z. Chen, D. A. Basnayaka, X. Wu, and H. Haas, «Interference mitigation for indoor optical attocell networks using an angle diversity receiver» Journal of Lightwave Technology, vol. 36, no. 18, pp. 3866–3881, Septiembre 2018.
- [31] L. Yin, X. Wu, H. Haas, «On the performance of non-orthogonal multiple access in visible light communication,» IEEE 26th Annual Symposium Personal, Indoor Mobile Radio Communications, Hong Kong, Septiembre 2015.
- [32] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C.-L. I, Z. Wang, «Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends,» IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 9, Septiembre 2015.
- [33] C. Chen, D. A. Basnayaka, and H. Haas, «Downlink performance of optical attocell networks» Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 1, pp. 137–156, Enero

2016.

- [34] «Ley 9/2014, de 9 de mayo, General de Telecomunicaciones» B.O.E. Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/l/2014/05/09/9/con> [Acceso en Diciembre, 2018]
- [35] «Real Decreto 346/2011, de 11 de marzo, por el que se aprueba el reglamento regulador de las infraestructuras comunes de telecomunicaciones para el acceso a los servicios de telecomunicación en el interior de las edificaciones» B.O.E. Septiembre 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-5834> [Acceso en Diciembre, 2018]
- [36] «Ley Orgánica 3/2018, del 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales» B.O.E. Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2018-16673> [Acceso en Diciembre, 2018]
- [37] Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. [En línea]. Disponible en: <https://www.ieee.org/> [Acceso en Diciembre, 2018]
- [38] Unión Internacional de Telecomunicaciones. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/es/Pages/default.aspx> [Acceso en Diciembre, 2018]
- [39] Conferencia Europea de Administraciones de Postales y Telecomunicaciones. [En línea]. Disponible en: <https://www.cept.org/cept/> [Acceso en Diciembre, 2018]
- [40] Comité Europeo de Normalización Electrotécnica. [En línea]. Disponible en: <https://www.cenelec.eu/> [Acceso en Diciembre, 2018]
- [41] Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación. [En línea]. Disponible en: <https://www.etsi.org/> [Acceso en Diciembre, 2018]
- [42] Body of European Regulators for Electronic Communications. [En línea]. Disponible en: <https://bereg.europa.eu/> [Acceso en Diciembre, 2018]
- [43] Asociación Española de Normalización. [En línea]. Disponible en: <https://www.aenor.com/> [Acceso en Diciembre, 2018]
- [44] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. [En línea]. Disponible en:

<https://www.cnmc.es/> [Acceso en Diciembre, 2018]

- [45] K. Pretz, «IEEE Task Force Works on Standard for Light Communications» Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <http://theinstitute.ieee.org/>. [Acceso en Diciembre, 2018]
- [46] S. Scace, «The world is getting a global LiFi standard» Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://purelifi.com> [Acceso en Diciembre, 2018]
- [47] «Status of IEEE 802.11 Light Communication TG» [En línea]. Disponible en: http://www.ieee802.org/11/Reports/tgbb_update.htm [Acceso en Octubre, 2018]
- [48] J. Cedillo, «Impacto económico en redes wi-fi: aplicación en centro comercial» Septiembre 2017. [Acceso en Enero, 2019]
- [49] M. Riquelme, «Las 5 fuerzas de Porter. Clave para el éxito de la empresa» Junio 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.5fuerzasdeporter.com/> [Acceso en Enero, 2019]
- [50] Smartlighting, «Avances en la estandarización de la tecnología LiFi» Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://smart-lighting.es/> [Acceso en Diciembre, 2018]
- [51] «Tabla de coeficientes de amortización lineal» [En línea]. Disponible en: <https://www.agenciatributaria.es/> [Acceso en Enero, 2019]